PROCEEDINGS



SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, BRAZIL
OCTOBER, 2022

PROCEEDINGS OF SITRAER 2022

AIR TRANSPORTATION SYMPOSIUM

São José dos Campos, Brazil | 25-27/Oct 2022

Edited by

Giovanna M. Ronzani Borille
Rogéria de Arantes Gomes
Evandro José da Silva
Mauro Caetano
Cláudia Azevedo Pereira

ISSN: 2448-1912

The contents of this volume can be used given that the authors are cited. The reproduction of the whole article in any medium is forbidden, unless authorized by the authors.

SBTA. Brazilian Air Transportation Research Society.

Catalogação – Divisão de Informação e Documentação/Biblioteca do ITA

Simpósio de Transporte Aéreo / Instituto Tecnológico de Aeronáutica. N. 19 (2022). São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022.

Anual
ISSN: 2448-1912

1. Transporte Aéreo. I. Borille, Giovanna Miceli Ronzani, ed. II. Título

CDU: 656.7

ORGANIZATION

Organizing Committee

Giovanna M. Ronzani Borille
Rogéria de Arantes Gomes
Evandro José da Silva
Mauro Caetano
Cláudia Azevedo Pereira
Adriano da Rocha Ferreira
Carolina Silva Anselmo
João Vitor Turchetti Ribeiro
Larissa Faria Ribeiro
Luca J. Santos
Marcelo Saraiva Peres
Matheus Novaes Valinho
Thiago Milanez Cypreste

Reviewers

Alessandro Vinícius Marques de Oliveira
Alex Gomes de Barros
Carlos Henrique Gomes
Carlos Müller
Celso José Leão e Silva
Cláudia Azevedo Pereira
Claudinei Walker da Silva
Cláudio Jorge Pinto Alves
Donizeti de Andrade
Eduardo Moraes Arraut
Eduardo Luiz Machado
Elton Fernandes
Evandro José da Silva
Fabiana Serra de Arruda
Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Giovanna Miceli Ronzani Borile
Guilherme Lohmann Palhares
Gustavo Sobreiro Santos
Hugo Santana de Figueirêdo Junior
Ítalo Romani de Oliveira
João Batista Camargo Junior
Jorge Braulio Cossío Durán
Jorge Eduardo Leal Medeiros
Jorge Miguel dos Reis Silva
Jose Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani
Li Weigang
Luís Henrique Gonçalves Costa
Marcelo Xavier Guterres
Marcelo da Silva Pinho
Maria Emília da Silva Baltazar
Mauro Caetano
Mayara Condé Rocha Murça
Michelle C. G. da Silva Pinto Bandeira
Patrícia Sauri Lavieri
Regis Martins Rodrigues
Rogéria de Arantes Gomes
Suelly Helena de Araujo Barroso
Victor Rafael Rezende Celestino
Viviane Adriano Falcão
Wilson Cabral de Sousa Junior

Support Committee

Fábio Renato Silveira
Guilherme dos Santos Zapola
Ítalo Romani de Oliveira
Marcus Vinicius do Nascimento

Acknowledgements

Aeronautics Institute of Technology - ITA
Parque Tecnológico de São José dos Campos

Speakers and Authorities

Alex de Barros- *Professor at University of Calgary*
Anderson Farias Ferreira- *Mayor of São José dos Campos*
Anderson R. Correia - *Rector of Aeronautics Institute of Technology – ITA*
Dany Oliveira - *Country Director - IATA Brazil*
Eduardo Henn Bernardi - *Director at Civil Aviation Secretariat - Brazilian Ministry of Infrastructure*
Eliezer de Freitas Cabral (Brig QOENG) – *DCTA*
Edgar Mendes Rodrigues - *EVE Mobility*
Eduardo Miguel Soares (Brig)- *DECEA*
Evanicio C. Costa- *Boeing Airport Compatibility Engineering*
Gustavo Alonso - *Professor at Universidad Politécnica de Madrid*
Humberto Pereira- *The Boeing Company*
Jefferson Cheriegatte – *Director of the Technological Park*
José Airton Patrício –*Atech*
Marcelo C. Cabral de Vasconcellos- *Head of Strategic Planning at GRU Airport*
Rodrigo Moser- *Aviation Expert at ANAC*
Rogério Benevides Carvalho- *Director at ANAC*
Ronei S. Glauzmann - *Civil Aviation Executive Secretary - Brazilian Ministry of Infrastructure*
Fábio Lourenço Carneiro Barbosa (Ten Cel) – *DECEA*
Thiago Nykiel- *CEO of INFRAWAY Engineering*
Rafael Laranjeira – CCR Aeroportos

Paper Awards

ANOMALY DETECTION IN APPROACH OPERATIONS AT SAO PAULO/GUARULHOS INTERNATIONAL AIRPORT

LUCAS COELHO E SILVA; MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA

POPULATION DENSITIES AND REAL ESTATE DEVELOPMENT ON THE ALIGNMENT OF SÃO PAULO'S CONGONHAS AND GUARULHOS AIRPORTS' RUNWAYS: THE REPLICATION OF A CONFLICTUAL FATE

LUIZ HENRIQUE WERNECK DE OLIVEIRA

FATORES DE ESCOLHA NA COMPRA DE PASSAGEM AÉREA: IMPORTÂNCIA PERCEBIDA E FREQUÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES PELOS CONSUMIDORES

GEORGE CHRISTIAN LINHARES BEZERRA; BRENNO RIBEIRO FERREIRA; CARLA GONÇALVES LEITE; CHRISTIAN ANDRÉ HADDAD GOVASTKI

Sponsors & Institutional Supporters

Aeronautics Institute of Technology - ITA
ANAC
Atech Company
CCR Aeroportos
Department of Airspace Control –DECEA
EVE Air Mobility
IBR Engenharia
INFRAWAY Engineering
International Airport of São Paulo - GRU Airport
The Boeing Company
Parque Tecnológico de São José dos Campos

Session Chairs

Alex de Barros– University of Calgary
Cláudia Azevedo Pereira– ITA
Cláudio Jorge Pinto Alves– ITA
Evandro José da Silva– ITA
Francisco Heber Lacerda de Oliveira– UFC
Guilherme dos Santos Zapola– Infraway
Henrique C. Marques– ITA
Ítalo Romani– Boeing
João Virgílio Merighi– Latersolo
Mauro Caetano– ITA
Marcos Roriz Jr– UFG
Michelle Carvalho G. S. P. Bandeira– UFG
Renata Cavion– UFSC
Rogéria de Arantes Gomes– ITA
Viviane Adriano Falcão– UFPE

Editorial Support

Vera Lucia Porto Romeu Junqueira

FOREWORD

SITRAER– Air Transportation Symposium – is an annual event organized by the Brazilian Air Transportation Research Society (SBTA). The SBTA is an independent society of scientific research, which aims to promote academic research and technical development of air transportation in Brazil and in Latin America. It was officially founded in December 2002, in São José dos Campos, SP, Brazil.

In 2022, the XIX SITRAER was held in the city of São José dos Campos, from October 25th to 27th. São José dos Campos is in the heart of a worldwide acknowledged aeronautical cluster and was recently certified as the first smart city in Brazil, along with 78 cities in the world. With these characteristics, the XIX SITRAER seeks the necessary interchange among the academia, the entrepreneurial world, the service providers, and the regulation authorities, so as to promote dissemination and debates of great value for this activity sector so important for the economy and the citizens' quality of life.

We thank the Aeronautics Institute of Technology (ITA) for all the logistical support, as well as the Parque Tecnológico administration. We also thank the reviewers, speakers, sponsors and participants who dedicated their time and spirit to make SITRAER a great event.

Giovanna M. Ronzani Borille
President of the Brazilian Air Transport Research Society

Rogéria de Arantes Gomes
Vice President of the Brazilian Air Transport Research Society

Index: Full Papers

ANÁLISE DE MACROTEXTURA DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM POR MEIO DA GEOESTATÍSTICA 17
ANTONIA FABIANA MARQUES ALMEIDA; FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA

O GERENCIAMENTO DO TRÁFEGO NÃO TRIPULADO COMO GÊNESIS DA INTEGRAÇÃO DOS DRONES AO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO 27
EDUARDO ARAÚJO DA SILVA; CARLOS EDUARDO VALLE ROSA

ANÁLISE DO PAVEMENT CONDITION INDEX AEROPORTUÁRIO COM USO DE ESTATÍSTICA ESPACIAL 33
ANTONIA FABIANA MARQUES ALMEIDA; FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA

AN ONTOLOGY TO SUPPORT BRAZILIAN TRAFFIC FLOW MANAGEMENT BASED ON NASAs ATM REFERENCE MODEL 43
LUÍS ANTONIO DE ALMEIDA RODRIGUEZ; JOSÉ MARIA PARENTE DE OLIVEIRA

CHALLENGES TO THE OPERATIONAL SAFETY AND SECURITY OF eVTOL AIRCRAFT IN METROPOLITAN REGIONS: A LITERATURE REVIEW 53
BRUNO GARCIA FRANCISCONE; ELTON FERNANDES

ACESSO AO TERMINAL AEROPORTUÁRIO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS: UMA ANÁLISE CONSIDERANDO INTERMODALIDADE FERROVIÁRIA 63
WELLINGTON LUIZ ROCHA DA SILVA FILHO; MARCELO XAVIER GUTERRES; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE; VIVIANE ADRIANO FALCÃO

UTILIZAÇÃO DO MODELO LOGIT BINOMIAL PARA DETERMINAÇÃO DE PROBABILIDADE DE ATRASO DE VOOS EM AEROPORTOS BRASILEIROS 73
WELLINGTON LUIZ ROCHA DA SILVA FILHO; EVANDRO JOSÉ DA SILVA; MARCELO XAVIER GUTERRES; MAURO CAETANO; VIVIANE ADRIANO FALCÃO

COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS ACN-PCN E ACR-PCR 82
RAFAEL MARQUES ALVES; CLÁUDIA AZEVEDO PEREIRA; JOSÉ ANTÔNIO SCHIAVON

BLOCKCHAIN-BASED TRAFFIC MANAGEMENT FOR ADVANCED AIR MOBILITY 90
ÍTALO ROMANI DE OLIVEIRA; THIAGO MATSUMOTO; EUCLIDES CARLOS PINTO NETO

ANÁLISE DO IMPACTO DO E-COMMERCE NA EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE DE CARGA AÉREA BRASILEIRA DURANTE A PANDEMIA DA COVID-19 100
MARIA CECÍLIA DE FARIAS DOMINGOS; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE; CAROLINA SILVA ANSÉLMO; ROGÉRIA DE ARANTES GOMES; VIVIANE ADRIANO FALCÃO

ENVIRONMENTAL EFFICIENCY DURING PUBLIC AIRPORT CONCESSION: THE CASE OF RECIFE INTERNATIONAL AIRPORT 110
MARIA CECÍLIA DE FARIAS DOMINGOS; EVANDRO JOSÉ DA SILVA; ROGÉRIA DE ARANTES GOMES; MAURO CAETANO; VIVIANE ADRIANO FALCÃO

ANÁLISE DAS DESFORMAÇÕES NAS CAMADAS DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TRENS DE POUSO 120
LUCAS CAVALCANTE DE ALMEIDA; ANTÔNIA FABIANA MARQUES ALMEIDA; LUCAS MOREIRA MAGALHÃES; FELIPE HERNANDES CAVA; FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA

UNPAVED RUNWAYS SURFACE: WHAT WE KNOW AND WHAT WE NEED TO KNOW 128
JOÃO VIRGILIO MERIGHI; RITA MOURA FORTES

ASSESSMENT OF AIRCRAFT EMISSIONS DURING LANDING AND TAKE-OFF (LTO) CYCLES AT GALEÃO INTERNATIONAL AIRPORT, RIO DE JANEIRO 134
JONATHAN GABRIEL DE OLIVEIRA PINHEIRO; MARCELINO AURÉLIO VIEIRA DA SILVA; ELTON FERNANDES

IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO SOFT E HARD PARA MINIMIZAR OS IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE TRANSPORTE AÉREO 147
GABRIELLA MACHADO DARZE; VICTOR HUGO SOUZA DE ABREU; ELTON FERNANDES; ANDRÉA SOUZA SANTOS

USO DA ABORDAGEM FUZZY PARA DETERMINAR CENÁRIOS ASSOCIADOS À ESCOLHA DE ÁREAS PARA INSTALAÇÃO DE VERTIPORTS 155
ADRIANO DA ROCHA FERREIRA; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE; EDUARDO MORAES ARRAUT; VINÍCIUS DO PRADO CAPANEMA

MOBILITY-AS-A-SERVICE COMO FACILITADOR DE ACESSO A AEROPORTOS: DESAFIOS E POTENCIAIS 166
MARILIA PEREIRA CAVALCANTI; MAURICIO OLIVEIRA DE ANDRADE ; VIVIANE FALCÃO

ANOMALY DETECTION IN APPROACH OPERATIONS AT SAO PAULO/GUARULHOS INTERNATIONAL AIRPORT 174
LUCAS COELHO E SILVA; MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA

BAGGAGE FEES AND THEIR EFFECTS ON AIR TRANSPORT DEMAND: AN EMPIRICAL STUDY ON TRANSPORT MODE SUBSTITUTION EFFECT 184
BRUNO FELIPE DE OLIVEIRA; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE; ALESSANDRO VINÍCIUS MARQUES DE OLIVEIRA

SEGURANÇA E PRODUÇÃO NO GROUND HANDLING EM AEROPORTOS: UMA ABORDAGEM POR MEIO DO DESIGN THINKING 194
RODRIGO FLÓRIO MOSER

A 5G SIGNAL COVERAGE PROPOSAL FOR ADVANCED AIR MOBILITY 204
GUILHERME TRINDADE TOLENTINO BERNARDO; MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA; MARCELO XAVIER GUTERRES

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR RTOS AIDED BY KANBAN METHOD 214
TIAGO MARTINS DE ALEXANDRE; JORGE RADY DE ALMEIDA JR

ASSESSMENT OF THE IMPACTS OF THE SISCEAB TRANSITION ALTITUDES HARMONIZATION PROJECT (TAHP) 223
RICARDO SILVA DE OLIVEIRA; JOSÉ MARIA PARENTE DE OLIVEIRA; ADILSON CLEÓMENES ROCHA; CRISTIAN DA SILVEIRA SMIDT; MARÍLIA GUSMAN THOMAZI

SUSTENTABILIDADE AEROPORTUÁRIA E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA ABORDAGEM BIBLIOMÉTRICA E MAPEAMENTO GRÁFICO 235
NATHANE ANA ROSA NEGRI; VIVIANE ADRIANO FALCÃO; HELIO QUEIROZ DA SILVA JUNIOR

A INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO NA SEGURANÇA OPERACIONAL AEROPORTUÁRIA 245
ALDAIANNY DE OLIVEIRA MAIA; RENATA DE SOUZA SALES; FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA PANDEMIA NA EFICIÊNCIA DOS AEROPORTOS BRASILEIROS: APLICAÇÃO DE ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS E REGRESSÃO TOBIT 253
LUCAS TAVARES DE BARROS MENDES; VIVIANE ADRIANO FALCÃO; HÉLIO DA SILVA QUEIROZ JÚNIOR; FRANCISCO GILDEMIR FERREIRA DA SILVA

ANALYSIS AND PREDICTION OF AIRSPACE AVAILABILITY FOR URBAN AIR MOBILITY OPERATIONS IN THE SAO PAULO METROPOLITAN REGION 263
JOÃO VITOR TURCHETTI RIBEIRO; MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA

PREVISÃO DE ATRASOS DE VOOS POR MACHINE LEARNING: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E METANALISE 273
HÉLIO DA SILVA QUEIROZ JÚNIOR; VIVIANE ADRIANO FALCÃO

ESCRITÓRIO DE PROJETOS DE MELHORIA: PROPOSTA PARA EMPRESA AEROPORTUÁRIA DE MÉDIO PORTE DO BRASIL 283
LUÍS HENRIQUE GONÇALVES COSTA; MARIO ORESTES AGUIRRE GONZÁLEZ; MARCOS ANDRÉ LIRA SILVA; ENILSON MEDEIROS DOS SANTOS; VIVIANE ADRIANO FALCÃO

AVALIAÇÃO TEMPORAL DA DINÂMICA DE OCUPAÇÃO ESPACIAL DO SOLO NAS ÁREAS DO ENTORNO DE AEROPORTOS REGIONAIS 293
ENZO CARMINE PICCHIELLO; MARCELO XAVIER GUTERRES; MICHELLE CARVALHO GALVÃO DA SILVA PINTO BANDEIRA; ANDERSON RIBEIRO CORREIA

AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS E PISTAS SEMI PREPARADAS 302
LIVIA FORTES MERIGHI; CLAUDIA AZEVEDO PEREIRA; JOSÉ ANTONIO SCHIAVON

SINERGIA ENTRE TRANSPORTE DE CARGA E PASSAGEIRO NA EFICIÊNCIA AEROPORTUÁRIA 311
VIVIANE ADRIANO FALCAO; FRANCISCO GILDEMIR FERREIRA DA SILVA

ESTUDO DA IMPLANTAÇÃO DE ENGINEERED MATERIAL ARRESTING SYSTEM (EMAS) NO AEROPORTO JORGE AMADO: ILHÉUS POR MEIO DE ANÁLISE DE RISCO 317
PATRÍCIA TIEKO LOPES OKUMA; FELIPE HERNANDES CAVA; CARLOS YUKIO SUZUKI

AIRCRAFT ACCIDENTS AND GROUND CASUALTIES NEAR AIRPORTS: EVIDENCE FROM GLOBAL SOUTH AND GLOBAL NORTH COUNTRIES 323
LUIZ HENRIQUE WERNECK DE OLIVEIRA

POPULATION DENSITIES AND REAL ESTATE DEVELOPMENT ON THE ALIGNMENT OF SÃO PAULO'S CONGONHAS AND GUARULHOS AIRPORTS' RUNWAYS: THE REPLICATION OF A CONFLICTUAL FATE 334
LUIZ HENRIQUE WERNECK DE OLIVEIRA

ECONOMIC AND POLITICAL INSTABILITY AFFECTING THE ATTRACTIVENESS OF SELECTED AIR TRAVEL DESTINATIONS CLOSE TO CONTINENTAL EUROPE FROM 2000 TO 2019 344
LUIZ HENRIQUE WERNECK DE OLIVEIRA

A COMPUTER MODEL FOR DETECTING AIRPORT LUGGAGE'S DIMENSIONS USING LOW-COST DEPTH SENSORS 355
VITOR DE ALMEIDA SILVA; MARCOS PAULINO RORIZ JUNIOR; MICHELLE CARVALHO GALVÃO DA SILVA PINTO BANDEIRA

IMPACT OF DISRUPTIVE SCENARIOS IN PASSENGER PROCESSING AT INTERNATIONAL AIRPORT TERMINALS: A SIMULATIVE STUDY 364
GIOVANNI BAUDER; IDOALDO LIMA; GIOVANNA RONZANI; JOHANNES REICHMUTH

IMPROVEMENTS ON ENGLISH LANGUAGE PROFICIENCY OF ATCO AND AFIS OPERATORS OF INFRAERO (ANSP) 374
MARCELINO ALVES DE ALMEIDA NETO

O SISTEMA DE ACESSO TERRESTRE AOS AEROPORTOS SANTOS DUMONT E GALEÃO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO 384
MATHEUS NOVAES VALINHO; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE; ANDERSON RIBEIRO CORREIA; MARCELO XAVIER GUTERRES

INTEGRATING THE MAINTENANCE PROCESS: A FRAMEWORK TO BRIDGE DESIGN FOR MAINTENANCE TO PRESCRIPTIVE MAINTENANCE 389
ASHRITH JAIN; ALESSANDRO GIACOTTO; HENRIQUE COSTA MARQUES; ALBERTO MARTINETTI

ANÁLISE DOS FATORES DE ESCOLHA DE MOBILIDADE AÉREA URBANA PARA O ACESSO AO AEROPORTO 400
CAROLINA SILVA ANSÉLMO; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE; FLAVIA RENATA DANTAS ALVES SILVA CIACCIA; WALLACE SILVA SANT'ANNA SOUZA

PROJETO EMBARQUE MAIS SEGURO 410
FELIPE PEREIRA DE SOUSA; EMMANUEL GOMES DA SILVA; PAULO HENRIQUE POSSAS

ANÁLISE DE PARÂMETROS DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL E RESPOSTAS DE ACELERAÇÃO VERTICAL EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS 418
LUCAS MOREIRA MAGALHÃES; FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA

THE CHALLENGES OF TRANSPORTING SPECIAL LOADS IN MILITARY AND CIVIL AIRCRAFT 428
PEDRO JOSÉ FURLANI VIDAL; TORBEN ALLERT; REBECCA TELES PONTE DE LIMA

CAPACIDADE DA INFRAESTRUTURA TERRESTRE PARA MOBILIDADE AÉREA URBANA (UAM VERTIPORT): A PAPER REVIEW 438
RODRIGO PINTUS GONÇALVES DA COSTA; MARCELO XAVIER GUTERRES; MAYARA CONDÉ ROCHA MURÇA; ANDERSON RIBEIRO CORREIA

MODELAGEM DO PROBLEMA DA ALOCAÇÃO DE FROTA APLICADO NA AVIAÇÃO REGIONAL BRASILEIRA A PARTIR DE FERRAMENTAS DA PESQUISA OPERACIONAL 447
JULIA RIBEIRO FELIPE; MATEUS RODRIGUES MIRANDA; VICTOR RAFAEL REZENDE CELESTINO

METODOLOGIAS PARA RESOLUÇÃO DE CONFLITOS ENTRE AERONAVES BASEADAS EM GAME TREE 457
LUCAS BORGES MONTEIRO; CRISTIANO PEREZ GARCIA; GERALDO PEREIRA ROCHA FILHO; LI WEIGANG

LIFE CYCLE COST OPTIMIZATION FOR E-VTOL CHARGING AND SUPPORT INFRASTRUCTURE PLANNING IN ON-DEMAND URBAN AIR MOBILITY 465
CAIO GONÇALVES NATALINO; HENRIQUE COSTA MARQUES; JOÃO PEDRO PINHEIRO MALÈRE

GERENCIAMENTO DO FLUXO DO TRÁFEGO AÉREO NO ECOSSISTEMA DA MOBILIDADE URBANA 475
JOSE AIRTON PATRICIO; ROGÉRIO YUGO TAKIMOTO; AGENIR DE CARVALHO DIAS

ANALYSIS OF ROUTES OVERLAPPING EFFECTS ON THE EFFICIENCY GAINS IN AIRLINE MERGERS 484
ERIC EDUARDO DE ALMEIDA; LUCAS MOROTTI DOS SANTOS; ANA BEATRIZ REBOUÇAS EUFRÁSIO; ROGÉRIA DE ARANTES GOMES

ANÁLISE CRÍTICA DAS OCORRÊNCIAS DE RISCO EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIO BRASILEIROS 497
RENATA DE SOUZA SALES; FRANCISCO HEBER LACERDA DE OLIVEIRA

NETLOGO COMO FERRAMENTA EM SIMULAÇÕES PARA O URBAN AIR MOBILITY (UAM) 505
FELIPE DESIGLO FERRARE; PAULO SÉRGIO CUGNASCA

FATORES DE ESCOLHA NA COMPRA DE PASSAGEM AÉREA: IMPORTÂNCIA PERCEBIDA E FREQUÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES PELOS CONSUMIDORES 514
GEORGE CHRISTIAN LINHARES BEZERRA; BRENNO RIBEIRO FERREIRA; CARLA GONÇALVES LEITE; CHRISTIAN ANDRÉ HADDAD GOVASTKI

BENEFITS OF A PAVEMENT MANAGEMENT PROGRAM WITH PCI-BASED ANALYSES WITHIN MILITARY AIRPORTS 524
ANTHONY BELO VASCONCELOS SANTOS; RICARDO MIRANDA CORDOVIL; RAFAELA MALAFIA NASSIF DAGHER; HUDSON GOMES DE MORAES

A GRAPHICAL ANALYSIS OF AIR TRAVEL DEMAND AND SOCIAL DEVELOPMENT: THE ROLE OF FINANCIAL INCLUSION 534
LUCA JOSÉ DOS SANTOS; ALESSANDRO VINICIUS MARQUES DE OLIVEIRA

AN EMPIRICAL STUDY ABOUT MORAL DAMAGES AND RULING 210 FROM THE BRAZILIAN SUPREME COURT IN PASSENGERS' RIGHTS: THE NEED FOR A CLEAR PUBLIC POLICY 540
JOSÉ GABRIEL ASSIS DE ALMEIDA; LYDIA DE FREITAS VIANNA; JOAO MARCELO SANT´ANNA COSTA

FRAMEWORK PARA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS EVTOL - REQUISITOS TÉCNICOS 545
ALFREDO ALMEIDA DE ARAUJO; JOÃO BATISTA CAMARGO JUNIOR; LESTER DE ABREU FARIA

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS COMPANHIAS AÉREAS POR ROTAS: CASO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DO RECIFE 555
DANIEL LOPES NADER DE AZEVEDO; VIVIANE ADRIANO FALCÃO; HÉLIO DA SILVA QUEIROZ JÚNIOR

ANÁLISE PARA VIABILIDADE DE UMA AEROTROPOLE: APLICAÇAO PARA SUBSIDIAR DECISOES NO CENÁRIO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE FORTALEZA/CE 565
FABIANO ROCHA; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE; FABIO ROCHA BARBOSA

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE DETECÇÃO ATRAVÉS DE CÂMERAS EMBARCADAS EM VANTS NO PROCESSO DE DETECTAR E DESVIAR DE OUTRA AERONAVE 575
VINÍCIUS MAURÍCIO DE ALMEIDA; PAULO SERGIO CUGNASCA

MACHINE LEARNING APPLIED IN THE EVALUATION OF AIRPORT PROJECTS 586
ÍTALO GUEDES DOS SANTOS; MAX LIRA VERAS XAVIER ANDRADE; CLEBER ZANCHETTIN

A CONCEPTUAL MODEL TO THE USE OF INTELLIGENT COOPERATIVE TRUCK AND DRONE LOGISTIC OPERATION 595
BRUNO AVELINO DE ARAUJO OLIVEIRA; MAURO CAETANO

ANÁLISE DO IMPACTO DA PANDEMIA DO COVID-19 NA MOVIMENTAÇÃO DE PASSAGEIROS EM AEROPORTOS QUE SERVEM CIDADES TURÍSTICAS BRASILEIRAS 603
IVACIANE DE QUADRA MAGALHÃES; ANDERSON RIBEIRO CORREIA; MICHELLE CORREIA GALVÃO DA SILVA PINTO BANDEIRA; GIOVANNA MICELI RONZANI BORILLE

ASSESSING A DRONE BASED LAST MILE LOGISTICS SOLUTION 612
BRUNO LAMISCARRE; INNOCENT E. DAVIDSON; LUIS GUSTAVO ZELAYA CRUZ; FELIX MORA-CAMINO

GENERATING SCENARIOS FOR AIR TRANSPORT SUSTAINABILITY 620
HILDA KARAM; E. ANWAMA ; INNOCENT E. DAVIDSON; FABIO KRIKHTINE; HAMDAN ALFAZARI; FELIX MORA-CAMINO

A NEW INTRINSIC METRICS FOR AIR TRAFFIC COMPLEXITY 627
PATRICE ZOMBRÉ; INNOCENT E. DAVIDSON; RAFAEL LIMA DE CARVALHO; GEORGES MYKONIATIS; FELIX MORA-CAMINO

CHARACTERIZATION OF RUBBER DEPOSITS USING IMAGE PROCESSING AND LANDING AND TAKEOFF ANALYSIS 635
TIAGO SILVEIRA DE ANDRADE AQUINO; FRANCISCO HEBER LACERDA OLIVEIRA; GUSTAVO ANTONIO S. MOTA

MODELAGEM PREDITIVA DE CRESCIMENTO URBANO EM REGIÃO AEROPORTUÁRIA - UM ESTUDO DE CASO **645**
NATALIA X. MOREIRA, MATHEUS N. VALINHO, MICHELLE C. S. P. BANDEIRA, ANDERSON R. CORREIA, CRISTIANO F. ALMEIDA, GERSON S. LISBOA

Index: Research Accepted as an Abstract

CONCESSÕES AEROPORTUÁRIAS NO BRASIL: CONTRIBUIÇÕES PARA AVALIAÇÃO EX-POST E DECISÃO SOBRE ABORDAGENS DE LONGO PRAZO 654
GEORGE CHRISTIAN LINHARES BEZERRA; MARCELO SAMPAIO CUNHA FILHO; MARCELO DE CANOSSA MACEDO; VINICIUS RESENDE DOMINGUES; WALMIR JOSE SOUZA

AVIATION FUEL TANKERING IN AN ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE CONTEXT 655
PETER O'REILLY; FABRICIO SULZBACHER; DIOGO COUTINHO; MARIA PETRESCU

THE POTENTIAL IMPACT OF A VOLUNTARY, NON-PUNITIVE SELF-REPORTING PROGRAM UNDER THE SCOPE OF THE BRAZILIAN CIVIL AVIATION AUTHORITY 656
PETER O'REILLY; FELIPE PITON; LAERCIO ARAUJO; HEATHER OWEN-PERRY

ADVERSE WEATHER LOW-PROBALITY FORECAST EFFECTS ON FLIGHT FUEL PLANNING 657
PETER O'REILLY; BURAK CANKAYA; PAULO LANZARINI; DIOGO UMSZA; MANOEL VALENTE

INTER-DOM INTEGRATED TERMINALS- THE IMPACT ON AIRLINES' EFFICIENCY AND SAFETY 658
PETER O'REILLY; LUCAS BONFIM; NATHALIA BIAO; STEPHANIE DOUGLAS

THE IMPACT OF UNSCHEDULED MAINTENANCE TO AN AIRLINE'S ON TIME PERFORMANCE 659
PETER O'REILLY; AUGUSTO DALAZEN; GIOVANNA SIMOES; BURAK CANKAYA; BEATRIZ PONZONI



RESEARCH ACCEPTED AS A FULL PAPER

ANÁLISE DE MACROTEXTURA DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM POR MEIO DA GEOESTATÍSTICA

Antonia Fabiana Marques Almeida*, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

*** E-mail do autor de correspondência**: fabiana@det.ufc.br

PAPER ID: SIT139

RESUMO

A macrotextura é uma importante variável de segurança operacional de pousos e decolagens, pois permite conhecer a aderência pneu-pavimento e o consequente risco de derrapagem ou aquaplanagem em situação de superfície molhada. Esse parâmetro também é responsável por facilitar a drenagem superficial por meio do escoamento das águas pluviais. A macrotextura pode ser classificada de acordo com a profundidade da textura, em mm, em uma escala de cinco categorias que varia de muito fechada a muito aberta. A redução desse parâmetro em pistas de pouso e decolagem (PPD) também é afetada pelo acúmulo de borracha oriundo dos pneus dos trens de pouso das aeronaves, além de outros contaminantes, que preenchem a superfície dos revestimentos, tornando sua textura mais fechada. Essas medidas são tomadas em pontos espacializados ao longo da PPD e, portanto, podem ser analisadas com o uso de Geoestatística. Diante do exposto, este artigo tem o objetivo de verificar padrões de macrotextura e sua modelagem por meio do método geoestatístico denominado Krigagem Ordinária. Para tanto, foram georreferenciados os pontos de análise de macrotextura na PPD de um aeroporto brasileiro coletados em 2018. Analisou-se a hipótese de existência de padrão espacial da macrotextura e modelaram-se valores de profundidade das regiões onde não foram realizados levantamentos de campo. O resultado deste estudo é um mapa de calor com os valores estimados de macrotextura para toda a extensão da PPD analisada. Espera-se, com esses resultados, auxiliar a tomada de decisão dos operadores de aeródromos quanto às ações de manutenção e reabilitação que devem ser adotadas para garantir a macrotextura adequada da PPD, priorizando a segurança operacional da aviação civil.

Palavras-chave: Macrotextura, Pavimento, Geoestatística, Krigagem Ordinária.

1. INTRODUÇÃO

Com o dinamismo econômico, a demanda por deslocamentos pelo modo aéreo aumentou nas últimas duas décadas, tanto para transporte de passageiros como de cargas, com exceção ao período de restrições sanitárias devido à pandemia da Covid-19. Conforme ANAC (2022), comparando Junho/2021 a Junho/2022, houve um acréscimo de 68,0% na demanda doméstica e 292,1% da demanda internacional em RPK (*Revenue Passenger-Kilometers* - Passageiros pagos transportados). Também houve um acréscimo de 16,6% e de 20,3% em cargas domésticas e internacionais transportadas em toneladas, respectivamente.

Esse aumento na demanda gera maior frequência de operações de pousos e decolagens nos aeródromos brasileiros. Assim, o controle do pavimento para garantir a segurança das operações deve ser periódica. Um dos parâmetros que garantem essa segurança em pavimentos aeroportuários é a textura da superfície, representada pela macrotextura.

A macrotextura é um parâmetro importante em pavimentos rodoviários e aeroportuários, pois auxilia na resistência à derrapagem e à aquaplanagem (Ahammed & Tighe, 2008, Zieja *et al.*, 2021). Em aeroportos, a macrotextura é uma das variáveis mais verificadas e controladas. Nas pistas de pouso e decolagem (PPD), há um agravante que pode resultar na redução da profundidade de macrotextura, que é o acúmulo de borracha decorrente dos contatos dos trens de pouso nas aterrissagens. Além disso, outros contaminantes, como detritos, óleos e lubrificantes, dentre outros, podem proporcionar deficiências à macrotextura.

Quanto maior a quantidade de operações em uma PPD, maior o acúmulo de borracha oriundo do contato pneu-pavimento e desgaste do revestimento. Assim, a frequência mínima de medições de macrotextura depende da média de pousos diários de aeronaves. Quando realizado o levantamento de campo, por meio do ensaio da Mancha de Areia, devem ser considerados cada terço de pista para classificação de acordo com ANAC (2020).

A medição da macrotextura é realizada pontualmente, com localização conhecida. Considerando a PPD, todos os pontos de coleta podem ser georreferenciados, podendo essas informações serem utilizadas para estimar os valores de profundidade da macrotextura nas demais regiões da PPD. Um método de modelagem possível é com a Geoestatística com a Krigagem Ordinária.

Em pavimentos rodoviários têm sido conduzidos estudos que buscam modelar valores médios de macrotextura com base em outros parâmetros, como Chen *et al*. (2017) e Praticò *et al*. (2021) que utilizaram a composição dos materiais constituintes do revestimento e Dan *et al*. (2022) que usaram os carregamentos do tráfego. No âmbito dos pavimentos aeroportuários, a modelagem da macrotextura tem sido estudada em menor escala, sendo mais utilizada para prever outros parâmetros, como por exemplo o coeficiente de atrito.

Registram-se, em aeroportos, trabalhos como os de Ghaderi & Abedini (2021) que buscaram estimar com processamento digital de imagens, e Chou & Chu (2022) que identificaram que a macrotextura reduz significantemente com as operações de pouso. Não foram identificados estudos que utilizaram a Geoestatística como ferramenta de modelagem da macrotextura. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o uso da Krigagem Ordinária na modelagem Geoestatística da macrotextura em uma PPD brasileira.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Macrotextura

De acordo com Bernucci *et al*. (2022, p. 668), a textura de um pavimento é um parâmetro de possível intervenção por parte dos especialistas, por isso é constantemente avaliado. Ainda segundo esses autores, a textura é dividida em microtextura (depende da superfície dos agregados) e macrotextura (depende da rugosidade formada pelo mástique e os agregados) (Figura 1).

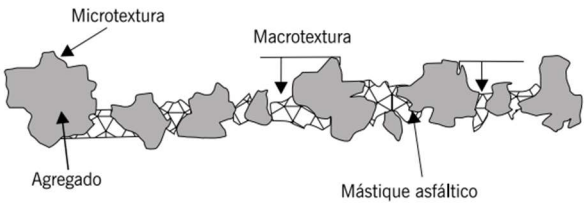


Figura 1 Micro e macrotextura de uma superfície asfáltica. Fonte: Bernucci *et al.* (2022).

A medição da macrotextura de pavimentos aeroportuários no Brasil é regulamentada por ANAC (2020), que indica que deve ser medida em toda a extensão da pista. Devem ser realizadas em áreas localizadas a 3 m do eixo da PPD, de forma alternada a cada 100 m em ambos os lados – direito e esquerdo.

ANAC (2020) também recomenda que a profundidade média da macrotextura deve ser igual ou superior a 0,60 mm. Valores inferiores a 0,40 mm indicam macrotextura que tendem à fechada ou muito fechada, assim como valores superiores a 0,80 mm, aberta ou muito aberta, considerando-se a respectiva classificação de ANAC (2020). O ensaio para realizar a medição do parâmetro é o Método da Mancha de Areia, que consiste no espalhamento de um volume de areia de 24 cm³, com granulometria controlada, estando entre as peneiras Nº 50 e 100. Mede-se então o diâmetro da areia espalhada e, com isso, determina-se a profundidade média da macrotextura no revestimento.

A macrotextura de cada medição é calculada pela Equação (1). Devem ser realizadas 3 medições, e o resultado da profundidade da textura da região é a média aritmética, conforme Equação (2). A Equação (3) apresenta a forma de calcular o parâmetro para cada terço de pista.

$$M_i = \frac{4 \times V}{D^2 \times \pi} \times 10 \quad (1)$$

$$M_{área} = \frac{\sum_{i=1}^{3}(M_i)}{3} \quad (2)$$

$$M_{média} = \frac{\sum_{j}^{N} M_{área}}{N} \quad (3)$$

Onde,

M_i é a profundidade da macrotextura de uma medição (mm);

V é o volume de areia correspondente a 24 cm³;

D é o diâmetro da areia espalhada no ensaio (cm);

$M_{área}$ é a profundidade média de 3 medidas de macrotextura (mm);

$M_{média}$ é a macrotextura média do terço de pista (mm); e

N é a quantidade de $M_{área}$ calculados em cada terço de pista.

2.2. Geoestatística

A geoestatística pode ser definida, segundo Chilès & Delfiner (2012), como uma aplicação de métodos probabilísticos em variáveis regionalizadas, que possuem dependência espacial, permitindo quantificar incertezas no espaço por meio de modelagem. Tem como objetivo determinar o modelo de correlação espacial dos pontos de dados para estimativas e simulações estocásticas, que reflete o padrão de distribuição espacial dos dados e de frequências (Yamamoto, 2020, p. 100).

Para identificar o comportamento da variável analisada segundo uma direção, é utilizada uma função estruturada, o variograma (γ_h), que considera a variabilidade de um parâmetro de acordo com a distância entre os pontos analisados (Bárdossy, 2019). Nos variogramas são definidos o vetor de distância (*lag distance* - h) entre dois pontos que possuam correlação em determinadas direções a serem definidas.

Na etapa de modelagem são definidas a estrutura, se há presença do efeito pepita (que ocorre quando há uma descontinuidade no início do gráfico), dado por C_0, o modelo matemático que melhor se adequa ao conjunto de dados, a amplitude (a_1), que é a distância a partir da qual os dados não apresentam correlação espacial e a covariância espacial ($C_h = C_0 + C_1$) (Chilès e Delfiner, 2012). Caso não exista efeito de pepita, então $C_0 = C_1 =$ variância da amostra.

Com a determinação dessas informações, podem ser realizadas as estimativas de informações dos locais não amostrados. Uma possibilidade muito utilizada é a Krigagem Ordinária (KO) (Wackernagel, 1995, Kiš, 2016, Yamamoto, 2020). A KO, segundo Matheron (1963), é um método de interpolação que considera a suposição de estacionaridade e não requer o conhecimento do valor esperado da média ($m(x)$) dos valores.

Na interpolação por KO, deseja-se estimar o valor (Z^*) da variável analisada num ponto x_0 (Figura 2), localizado próximo aos demais pontos com valores conhecidos. O valor é então calculado com base nos valores ($Z(x_a)$) dos n pontos vizinhos amostrados combinados linearmente ao peso (w_α), conforme Equação (4).

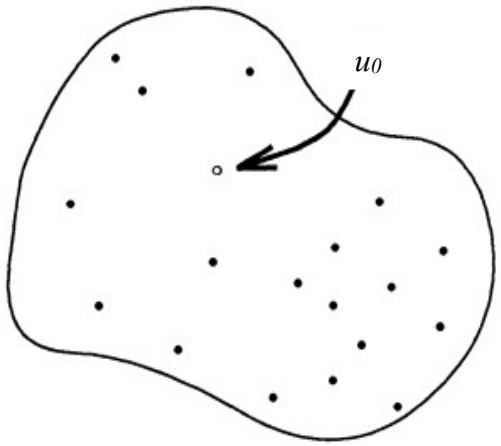


Figura 2 Pontos irregularmente espaçados e o ponto de interesse u_0. Fonte: Wackernagel (1995).

$$Z^*_{KO}(u_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^{KO} Z(u_i) \qquad (4)$$

Onde,

$Z^*_{KO}(u_0)$ é o valor da variável no ponto que se deseja estimar,

λ_i^{KO} são os pesos atribuídos aos dados amostrados, e

$Z(u_i)$ é a variável regionalizada amostrada, em que i = 1, 2, ..., n.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Para analisar os dados de macrotextura e realizar a estimativa desses valores, foi escolhida uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira com cerca de 2.545 m de extensão, 45 m de largura, designação de cabeceiras 13-31, executada com revestimento em Concreto Asfáltico (sem *grooving*), sendo cumpridas as seguintes etapas: (i) Coleta de dados de macrotextura, definição do polígono limite (extensão da PPD) e análise descritiva das informações de profundidade obtidas; (ii) Definição de variogramas para identificação das direções e do modelo teórico ideais; e (iii) Interpolação com Krigagem Ordinária e validação cruzada dos dados, considerando a *Root Mean Square Error* (RMSE), o coeficiente de determinação (R^2) e o índice I de Moran (e sua significância) como indicadores de desempenho. Dos resíduos da regressão linear para obter o R^2 foram testadas: distribuição normal (teste Jarque-Bera), heterocedasticidade (teste Breusch-Pagan) e robustez do modelo (teste White).

Para a interpolação foi definido um polígono externo à malha dos pontos amostrados como área limitante, com o intuito de minimizar possíveis erros oriundos da distância. Esse limite estabelecido é a própria PPD (2.545 m x 45 m). Para a interpolação foi definida uma malha com tamanho de *pixel* (1 m x 1 m). Como ferramentas computacionais foram utilizados:

- QGIS, versão 3.16.14, para gerar o arquivo *shapefile* da PPD e georreferenciamento dos pontos de medição da macrotextura;
- Biblioteca *Matplotlib* do Python, para apresentar a distribuição espacial dos pontos, e os gráficos de *boxplot*, histograma e de linhas;
- Biblioteca *Scikit GStat* do Python e *geoMS*, para calcular e apresentar os variogramas;
- *Plugin Smart-Map* do QGIS para a interpolação dos dados de macrotextura da PPD por Krigagem Ordinária e validação cruzada.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Coleta e caracterização dos dados

Os dados de medição de macrotextura da PPD de estudo indicam que, à época do levantamento (Maio de 2018), a cabeceira mais demandada foi a 13, com 70 dos 71 pousos de aeronaves. O levantamento para medição de profundidades de macrotextura foi realizado até a distância de 2.500 m.

Considerando a cabeceira 13 como ponto de partida da PPD, os valores de profundidade da macrotextura nos terços de pista foram 1,07 mm, 1,21 mm e 1,09 mm. A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva das informações de macrotextura e a Figura 3, a espacialização dos pontos verificados na medição.

Tabela 1 Estatística descritiva dos dados de macrotextura medidos em Maio de 2018 na PPD de estudo.

Parâmetro estatístico	Valores
Quantidade de pontos	26
Média	1,11 mm
Mediana	1,14 mm
Mínimo	0,74 mm
Máximo	1,42 mm
Desvio Padrão	0,17 mm
Variância	0,03 mm
Coeficiente de variação	0,15
Assimetria	-0,44

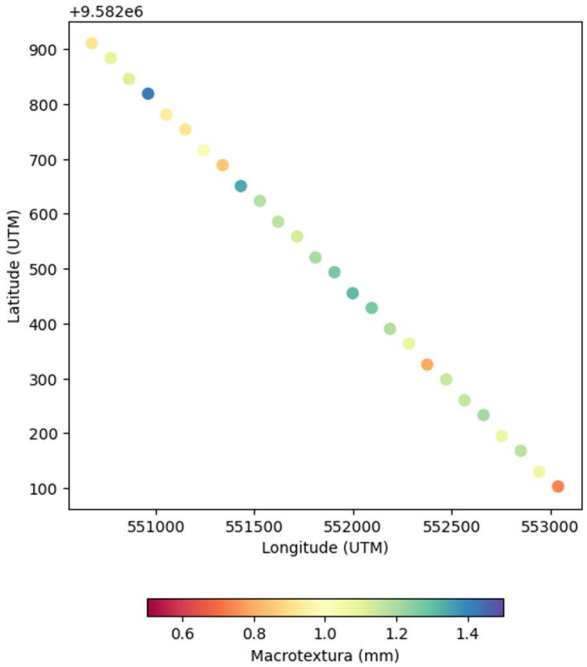


Figura 3 Pontos de realização da medição de macrotextura na PPD de estudo.

Verifica-se, a partir da Tabela 1, que a dispersão de informações de macrotextura calculadas é baixa, dado um coeficiente de variação (*cv*) de 0,15 e uma variância de 0,03. A assimetria negativa indica que a distribuição é enviesada à esquerda, ou seja, os dados estão mais presentes nas classes de maiores valores.

Da Figura 3 nota-se que, embora o *cv* seja baixo, há poucas repetições de valores. Todos os valores obtidos atenderam ao valor mínimo de 0,60mm. Foi calculado, no QGis, o I de Moran de 0,60 e o p-valor do teste de 0,15 indicando que não há autocorrelação espacial a um nível de significância de 5%. As figuras 4, 5 e 6 apresentam o histograma, o *boxplot* e um gráfico de linhas dos dados obtidos de macrotextura.

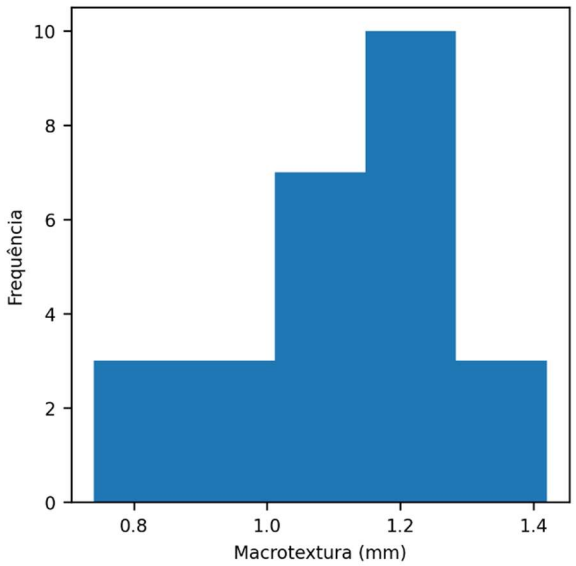


Figura 4 Histograma dos valores de macrotextura.

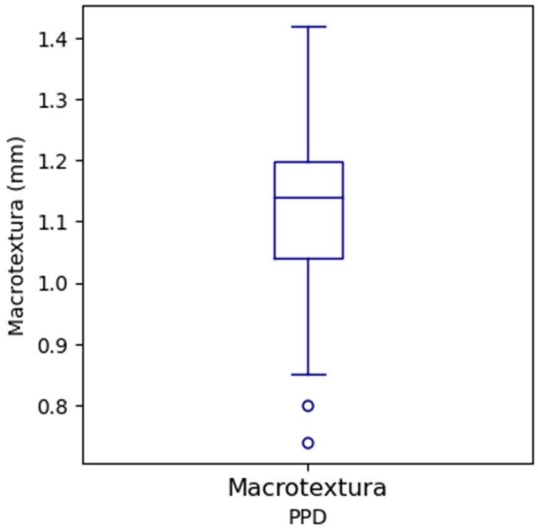


Figura 5 *Boxplot* dos valores de macrotextura.

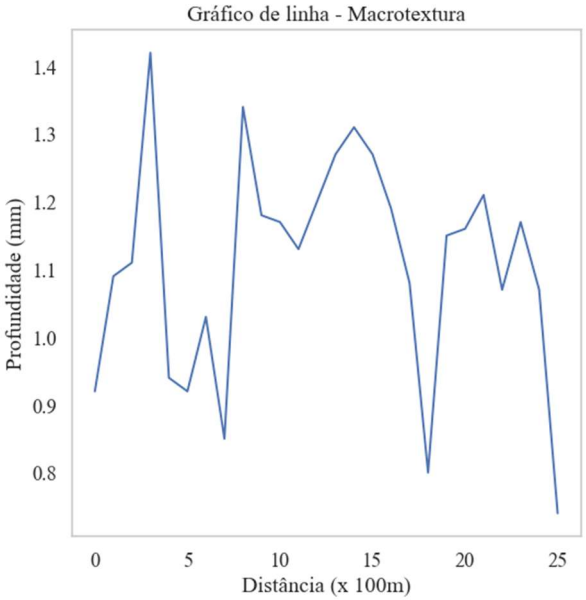


Figura 6 Gráfico de linhas dos valores de macrotextura.

Da Figura 4 pode-se confirmar o viés da distribuição calculado pela assimetria (Tabela 1). Foram definidas 5 classes, sendo as duas primeiras e a última com a mesma quantidade de elementos.

Na Figura 5 observa-se a indicação de existência de valores discrepantes (*outliers*). Assim, foi conduzido o Teste de Grubbs em que não foram detectados *outliers*. Assim, todos os dados serão utilizados nas análises espaciais.

Pela Figura 6 observa-se que os menores valores de macrotextura estão próximos à marca de 1.900 m e de 2.500 m. Embora nenhuma medição tenha resultado em valores inferiores ao mínimo requerido, essas regiões podem indicar a necessidade prioritária de intervenção para melhoria da sua textura superficial, de modo a proporcionar maior aderência pneu-pavimento.

4.2. Definição dos variogramas

Embora a espacialização dos pontos siga uma direção em que o azimute é de 130º, essa orientação não foi testada, uma vez que não estão no mesmo alinhamento (devido à alternância na amostragem para medição da macrotextura). Além disso, os resultados obtidos nas simulações considerando essa direção não foram satisfatórios. Foi utilizada somente a análise na direção omnidirecional, uma vez que o intuito do estudo é estimar os valores de macrotextura em toda a extensão da PPD.

A Figura 7 apresenta os variogramas experimentais considerando seis modelos teóricos e os respectivos valores de *Root Mean Square Error* (RMSE) calculados. Para a construção dos variogramas omnidirecionais foram considerados os dados apresentados a seguir. Após a definição dos variogramas, serão informados os dados calculados como ideais para sua construção:

- Direção = de 0º a 360º (omnidirecional);
- Distância máxima de corte (*cut distance*) = 1.250 m (metade do comprimento do trecho medido de 2.500 m);
- *Lag distance* (*h*) = 110 m.

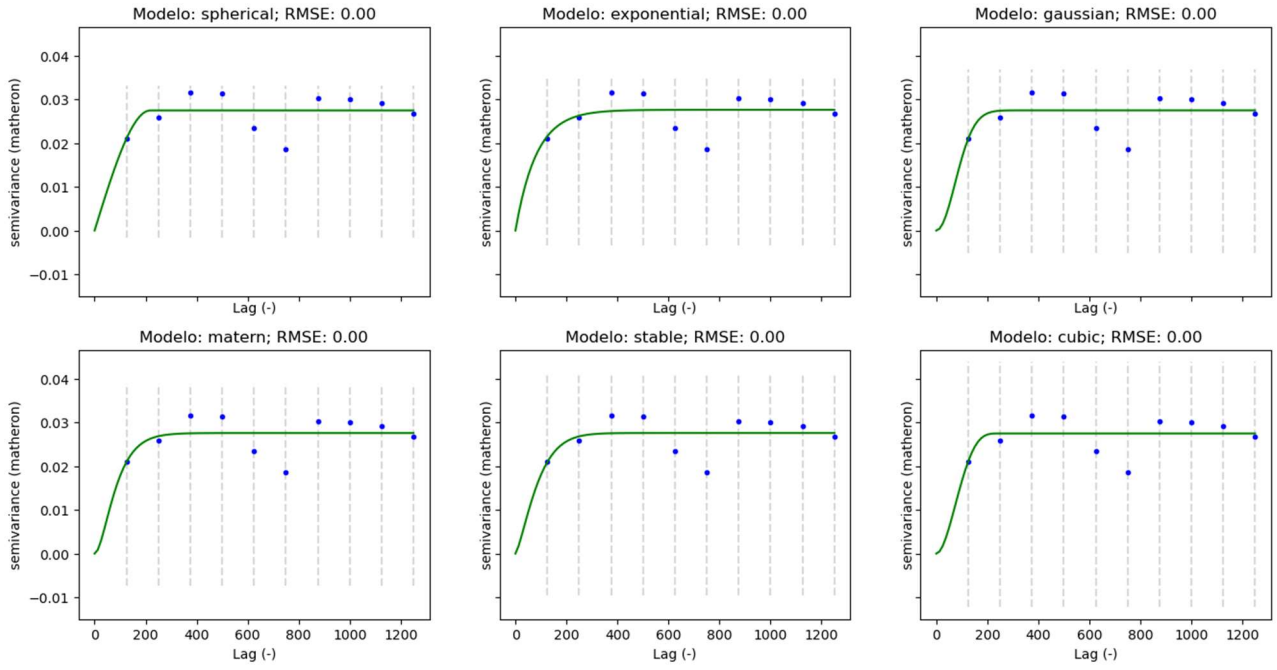


Figura 7 Variogramas experimentais omnidirecionais dos dados de macrotextura da PPD de estudo.

Ao analisar os variogramas da Figura 7, verificou-se que a RMSE foi nula em todos os modelos teóricos testados. Além disso, os variogramas apresentados não apresentaram efeito de pepita, mesmo assim foi realizada uma simulação considerando um valor de C_0 não nulo.

O modelo teórico do tipo esférico foi o adotado para a modelagem. As figuras 8 e 9 apresentam os variogramas com os parâmetros ajustados.

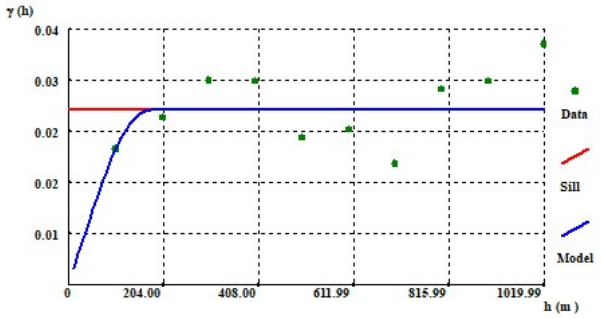


Figura 8 Variograma esférico omnidirecional ($C_0 = 0$).

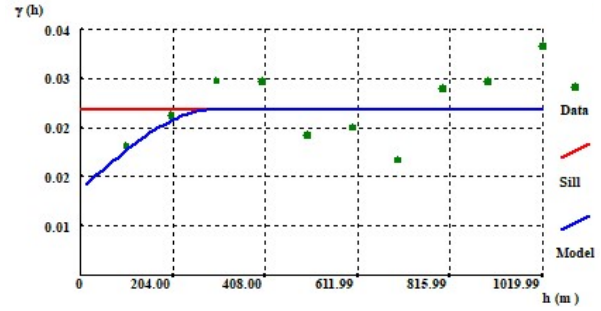


Figura 9 Variograma esférico omnidirecional ($C_0 \neq 0$).

O variograma da Figura 8, que não considerou o efeito de pepita (C_0 nulo), teve o valor de C_1 igual ao da variância da amostra (*sill* = 0,027). A amplitude verificada ($a_1 = 172{,}76\ m$) do ajuste foi superior a h considerada inicialmente (110 m).

O variogramas da Figura 9, com efeito de pepita teve $C_0 = 0{,}14$ e $C_1 = 0{,}13$. A amplitude verificada ($a_1 = 299{,}654\ m$) do ajuste também foi superior a h considerada inicialmente. As informações dos dois variogramas foram utilizadas na interpolação para comparação.

4.3. Interpolação

A interpolação por Krigagem Ordinária (KO) foi realizada considerando 4 vizinhos. O raio de busca foi o respectivo valor de amplitude fornecido pelos variogramas. As figuras 10 e 11 apresentam os mapas interpolados dos valores de macrotextura na PPD de estudo calculados em 114.527 pontos ao longo da sua extensão considerando o modelo esférico.

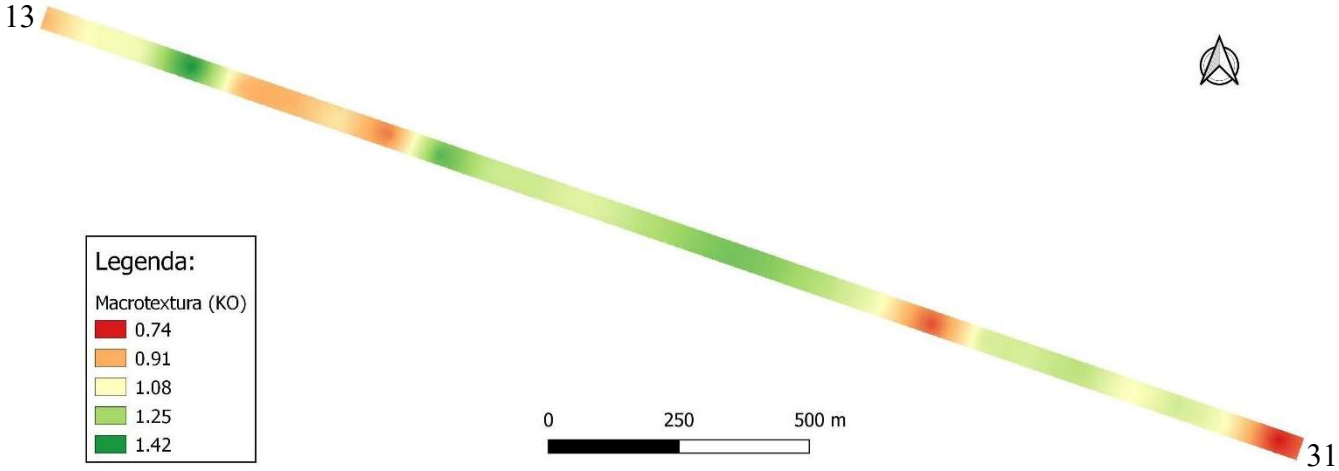


Figura 10 Mapa da PPD com valores de macrotextura interpolados pela KO sem considerar o efeito de pepita.

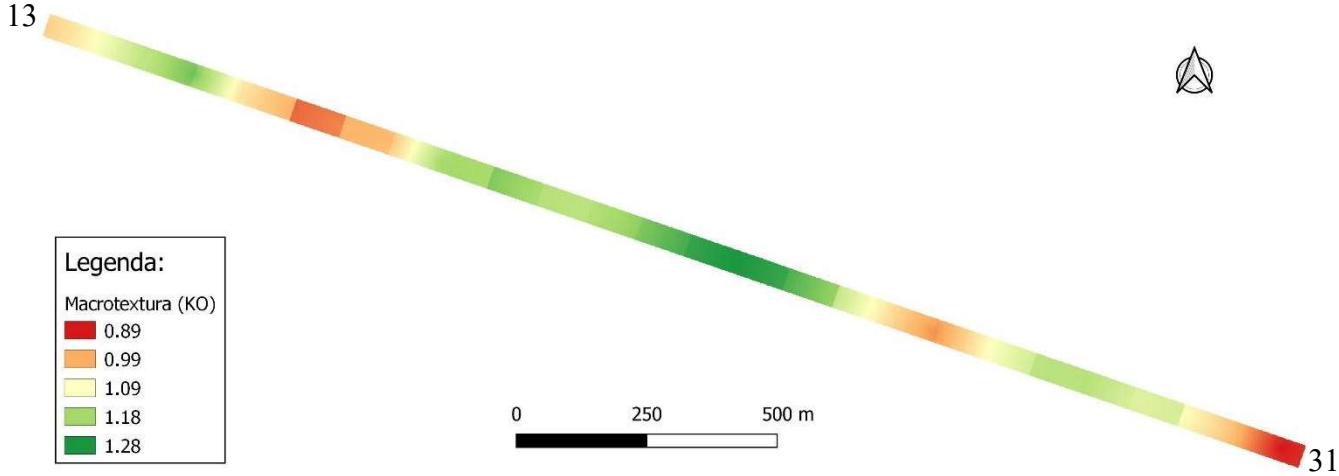


Figura 11 Mapa da PPD com valores de macrotextura interpolados pela KO com efeito de pepita.

Os mapas interpolados das figuras 10 e 11 apresentam algumas diferenças. A primeira, mais visual, mostra um efeito mais suave de interpolação quando não se considerou efeito de pepita (Figura 10). A amplitude dos dados estimados quando o efeito de pepita foi incorporado é inferior (0,39). Os resultados oriundos da interpolação para macrotextura indicam um padrão de concentração de valores mais baixos e altos.

Ainda sobre os mapas de calor (figuras 10 e 11), as regiões que apresentaram os menores valores de macrotextura (cores vermelha e laranja) correspondem às zonas de toque das aeronaves durante os pousos (áreas próximas ao 1º e 3º terços). O terço central apresenta valores maiores, indicados pela cor verde. Também foram identificados valores de macrotextura baixos no extremo correspondente à cabeceira 31, que pode ter sido originado pelo desgaste natural do revestimento, dadas as condições ambientais. A validação cruzada (*cross-validation*) tem os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Resultados obtidos da validação cruzada com os valores previstos na etapa de interpolação.

Parâmetros	$C_0 = 0$	$C_0 \neq 0$
R^2	0,024	0,004
RMSE	0,17	0,17
I de Moran	0,62	0,67

Pode-se verificar, da Tabela 2, que a maior diferença entre as duas interpolações realizadas ocorreu no valor de R^2. No caso do índice I de Moran, embora a interpolação que considerou o efeito de pepita foi superior, o R^2 foi mais baixo. Já os valores de RMSE foram iguais nas duas interpolações.

Os resíduos da regressão linear para obter os valores de R^2 apresentaram distribuição normal, heterocedasticidade, robustez e não são dependentes espacialmente, tornando os valores preditos válidos nos dois casos. Quanto ao motivo dos baixos valores de R^2 pode-se citar a forma como os dados de coleta de macrotextura são especializados (num único ponto por levantamento), não apresentando uma cobertura em toda a largura da PPD, concentrando-se mais na região central.

Entre as duas opções de interpolação analisadas, o modelo teórico que não incorporou o efeito de pepita na sua formulação é o melhor a ser adotado para modelagem da profundidade da macrotextura considerando o aspecto espacial. A Tabela 3 apresenta um resumo dos dados estimados oriundos da interpolação por KO.

Tabela 3 Estatística descritiva dos dados de macrotextura estimados na PPD analisada.

Parâmetro estatístico	Valores
Quantidade de pontos	114.527
Média	1,11 mm
Mediana	1,14 mm
Mínimo	0,74 mm
Máximo	1,42 mm
Desvio Padrão	0,14 mm
Variância	0,02 mm
Coeficiente de variação	0,12
Assimetria	-0,54

Ao comparar os dados da Tabela 3 com os apresentados na Tabela 1, podem ser realizadas algumas constatações. Os valores de média, mediana, mínimo e máximo mantiveram-se iguais. Por sua vez, o desvio padrão, a variância e o *cv* foram reduzidos na modelagem. A assimetria ainda indica que o conjunto de informações apresenta uma distribuição com viés à esquerda. Ou seja, a modelagem gerou dados que seguem a mesma distribuição de frequências. As figuras 12 e 13 apresentam o histograma e o *boxplot* dessas informações.

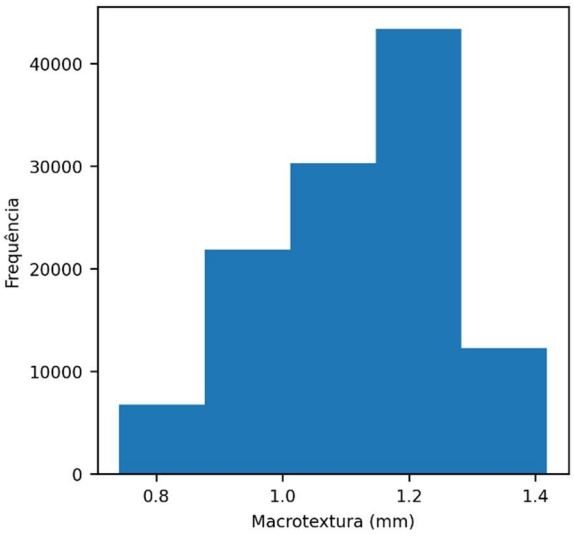


Figura 12 Histograma dos dados de macrotextura estimados na PPD de estudo.

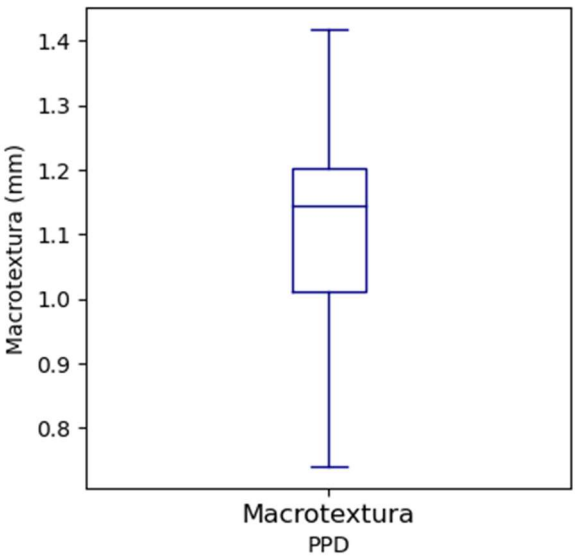


Figura 13 *Boxplot* dos dados de macrotextura estimados na PPD de estudo.

Pela Figura 12 observa-se que, embora a distribuição tenha mantido o comportamento, houve suavização das frequências de dados nas classes. Pelo *boxplot* observa-se que não há indicação da presença de *outliers* e, portanto, não foi necessária a aplicação de inferência para verificação.

5. CONCLUSÕES

O parâmetro macrotextura, por ser importante na segurança operacional de pousos e decolagens, é regularmente medido. São realizadas verificações em pontos específicos das pistas de pouso e decolagem (PPD) em toda a sua extensão longitudinal. Essas medidas são capazes de gerar um mapa georreferenciado com as informações de profundidade média da macrotextura.

Por tratar-se de um conjunto de pontos distribuídos espacialmente, com uma variável quantitativa, podem ser analisados com a Geoestatística. Este trabalho buscou realizar essa análise e, com as informações obtidas, estimar as informações nos pontos não amostrados com a Krigagem Ordinária.

Embora com coeficiente de determinação baixo (R^2 =0,023), o mapa de calor estimado de macrotextura da PPD de estudo pode ser utilizado como apoio para análise da condição superficial da pista. Esse valor do R^2 reduzido pode ter ocorrido devido à forma como os pontos são levantados em campo, abrangendo mais a região próxima ao eixo da PPD.

Os dados estimados ao longo da área considerada limite tiveram, estatisticamente, valores próximos aos reais, porém, com menor variabilidade, desvio padrão e variância, o que permite concluir que a estimativa ocorreu dentro de uma amplitude esperada. Assim, espera-se que mapas produzidos a partir de análises que considerem a distribuição espacial de informações importantes possam ser utilizados pelos operadores de aeródromos brasileiros em tomadas de decisões para intervenção de manutenção e reabilitação da macrotextura nas pistas de pousos e decolagens com o objetivo de garantir a segurança das operações.

Pode-se inferir, portanto, que a variável macrotextura, apresentada em forma de profundidade média (em mm), medida pelo método da Mancha de Areia, pode ser analisada espacialmente com a Geoestatística. A Krigagem Ordinária permitiu gerar um mapa de calor com as informações estimadas desse parâmetro nas regiões em que não houve medidas.

Referências

Ahammed, M. A., & Tighe, S. L. (2008). Pavement Surface Mixture, Texture, and Skid Resistance: A Factorial Analysis. *Airfield and Highway Pavements*. DOI: 10.1061/41005(329)32.

ANAC. (2020). Agência Nacional de Aviação Civil. Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista de pouso e decolagem. IS Nº 153.205-001, Revisão B.

ANAC. (2022). Demanda e oferta do transporte aéreo. Passageiros e carga. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiM2UzMGE2ZmQtOTBkMy00ZjMzLTk2MjAtMWE0MDI0YzkzYjFiIiwidCI6ImI1NzQ4ZjZlLWI0YTQtNGIyYi1hYjJhLWVmOTUyMjM2ODM2NiIsImMiOjR9, Acesso em 12 de agosto de 2022.

Bárdossy, A. (2019). Introduction to Geostatistics. Institute of Hydraulic Engineering. University of Stuttgart. Disponível em: https://osf.io/6jzpn/. Acesso em: 30 jul. 2022.

Bernucci, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2022). Pavimentação

Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, Petrobras, ABEDA. 2ª ed.

Chen, D., Han, S., Ling, C., & Su, Q. (2017). Prediction of asphalt mixture surface texture level and its distributions using mixture design parameters. *International Journal of Pavement Engineering*. 20(5). DOI: 10.1080/10298436.2017.1316644.

Chilès, J. P., & Delfiner, P. (2012). Geostatistics - Modeling Spatial Uncertainty. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

Chou, C., & Chu, Y. C. (2022). Application of friction–speed model to evaluate runway surface microtexture and macrotexture: a case study. International Journal of Pavement Engineering. DOI: 10.1080/10298436.2022.2044034.

Dan, H., Gao, L., Wang, H., & Tang, J. (2022). Discrete-Element Modeling of Mean Texture Depth and Wearing Behavior of Asphalt Mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 34, Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004165.

Ghaderi, O., & Abedini, M. (2021). Evaluation of the airport runway flexible pavement macro-texture using digital image processing technique (DIPT). International Journal of Pavement Engineering. DOI: 10.1080/10298436.2021.1968393.

Kiš, I. M. (2016). Comparison of Ordinary and Universal Kriging interpolation techniques on a depth variable (a case of linear spatial trend), case study of the Šandrovac Field. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*. DOI: 10.17794/rgn.2016.2.4.

Matheron, G. (1963). Traité de géostatistique appliquée. Tome II – Le Krigeage. Paris, BRGM. 171 p.

Praticò, F. G., Briante, P. G. & Celauro, C. (2021). Modelling pavement surface characteristics for noise prediction through Bailey-related indicators. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 14, 222–231. DOI: 10.1007/s42947-020-0095-z.

Wackernagel, H. (1995). Ordinary Kriging. In: Multivariate Geostatistics. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-03098-1_11.

Yamamoto, J. K. (2020). Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais. Gráfica Paulos, São Paulo.

Zieja, M., Wesołowski, M., Blacha, K., & Iwanowski, P. (2021). Analysis of the Anti-Skid Properties of New Airfield Pavements in Aspect of Applicable Requirements. *Coatings*, 11 (778). DOI: 10.3390/coatings11070778.

O GERENCIAMENTO DO TRÁFEGO NÃO TRIPULADO COMO GÊNESIS DA INTEGRAÇÃO DOS DRONES AO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO

EDUARDO ARAÚJO DA SILVA[1]
(DECEA)

Prof. Dr. CARLOS EDUARDO VALLE ROSA[2]
(UNIFA)

eduardopedagogia@hotmail.com / eduvalle80@hotmail.com

PAPER ID: SIT230

RESUMO

A aviação se transformou num dos meios de maior viabilidade para o transporte de passageiros e cargas. Frente ao desenvolvimento dos sistemas, nota-se um aumento exponencial do uso dos Drones, que trouxe novos conceitos e possibilidades para as operações aéreas. Segundo a OACI (2021), sem a devida harmonização global, poderão ocorrer danos à segurança, confiabilidade do sistema, eficiência econômica e ao meio ambiente. Os Drones se subdividem em três categorias: (i) Aeronave Remotamente Pilotada (ou *Remotely Piloted Aircraft* – RPA), (ii) Aeromodelos e (iii) Autônomos, sendo que a primeira atualmente já interage com o ATM, de maneira acomodada. O Gerenciamento do Tráfego Não Tripulado (UTM) busca segurança contínua ao tráfego aéreo e às pessoas no solo, propondo que haja metodologias suficientes para a efetividade da Mobilidade Aérea Urbana (UAM). O desenvolvimento desta pesquisa se justifica devido à imprescindibilidade de uma harmonização referente às operações complexas com Drones à baixa altura. O objetivo é apresentar, num contexto sociotécnico, o UTM como sendo a *gênesis* para a integração dos Drones ao espaço aéreo brasileiro, por meio de estruturas seguras e adequadas, em que Órgãos Reguladores, provedores de serviços, exploradores e Pilotos Remotos possam compartilhar dados e informações da e para a mobilidade urbana. Como pressuposto metodológico tem-se uma pesquisa de natureza exploratória, fundamentada na abordagem qualitativa. Vislumbra-se que a conclusão do estudo responda se os entes envolvidos são capazes de dispor das informações em tempo real, bem como se há estruturas adequadas por parte dos provedores de serviços e, também, se há viabilidade no fomento à tripla hélice (governo, academia e empresas) para o desenvolvimento do UTM.

Keywords: Aeronaves Não Tripuladas, Drones, Gerenciamento, Mobilidade Aérea Urbana, Poder Aéreo.

[1] Doutorando em Ciências Aeroespaciais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Aeroespaciais (PPGCA) da Universidade da Força Aérea (UNIFA). Mestre em Educação pelo PPGEduc da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Especialista em Direito Militar (UCAM) e Educação Tecnológica (CEFET/RJ). Graduado em Segurança Pública e Social (UFF), Pedagogia (FIC) e Gerenciamento de Tráfego Aéreo (CIAAR). É Oficial Especialista em Controle de Tráfego Aéreo.

[2] Doutor em Geografia (UFRN). Mestre em Ciências Aeroespaciais, com ênfase em Defesa/Poder Aeroespacial pela Universidade da Força Aérea (UNIFA). Bacharelado e Licenciatura em História (UFRN) e Bacharelado em Ciências Aeronáuticas (AFA). É especialista em Didática do Ensino Superior, Pedagogia Empresarial e possui MBA em Gestão Administrativa e Desenvolvimento Gerencial Avançado, e MBA em Gestão Estratégica em Defesa. É professor permanente do PPGCA da UNIFA.

1. INTRODUÇÃO

Observa-se no cenário contemporâneo uma busca permanente do Homem no sentido de poder estar em diversos locais, sobretudo, com uma maior otimização do tempo, na tentativa de efetivar suas ações com mais celeridade e eficiência. Esse escopo não poderia se desvincular da atividade aérea, já que a aviação se tornou um dos meios de maior viabilidade para o transporte de passageiros, possibilitando cada vez mais a prática da locomoção.

No âmbito da aviação, o ir e vir ocorrem em um ambiente bastante peculiar, qual seja o espaço aéreo, ou até mesmo numa porção dele, que, abrangendo um complexo conjunto de parâmetros técnicos e operacionais, proporciona uma das mais viáveis formas de mobilidade humana, o voo com aeronaves.

Para que a segurança e regularidade das operações sejam mantidas, há de se perceber a imprescindibilidade da vigilância e do controle dessas máquinas voadoras que, tripuladas ou não, tendem, mediante a evolução tecnológica das últimas décadas, a trafegar simultaneamente num mesmo ambiente.

O artigo 11, do Código Brasileiro de Aeronáutica (Lei 7.565/86), expressa que "a União exerce completa e exclusiva soberania sobre o espaço aéreo acima de seu território e mar territorial, cabendo à Força Aérea Brasileira (FAB), por meio do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), planejar, gerenciar e controlar as atividades relacionadas ao Controle de Tráfego Aéreo (ATC), a fim de manter o alto nível da segurança operacional".

Frisa-se que o ATC é parte da tríade do Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM, do inglês *Air Traffic Management*), que ainda engloba o Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo e do Espaço Aéreo (ATFM e ASM, respectivamente).

Os Estados e entes reguladores têm recebido elevadas demandas relativas voos de *Drones* e, não obstante se observe uma crescente proliferação de aeronaves não tripuladas (UA) robustas, pelo fato de o grande porte também possuir aplicabilidade, como no emprego bélico, o maior volume desse tráfego é atinente aos voos de baixa altitude, limitados a 400 pés (aproximadamente 120 metros).

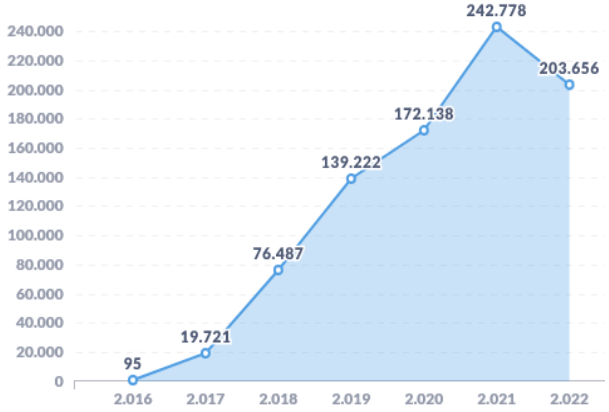
Por mais que no Brasil coexistam sistemas que compartilhem dados e informações, proporcionando o desenvolvimento de normas, planejamento, bem como das operações correntes, como, por exemplo, o Sistema para Acesso ao espaço aéreo brasileiro por Aeronaves Não Tripuladas (SARPAS), criado em 2016 pelo DECEA, cujas ferramentas disponibilizam meios para as análises dos voos em todo o território, faz-se mister fomentar uma concepção operacional que conceba um gerenciamento do tráfego não tripulado brasileiro, aos moldes dos padrões internacionalmente recomendados.

Segundo a OACI (2021), sem a devida harmonização global, poderão ocorrer danos à segurança, confiabilidade do sistema, eficiência econômica e, da mesma forma, ao meio ambiente.

O Brasil vem acompanhando tais evoluções, adaptando as ferramentas existentes para a prestação do serviço requerido pelas operações aéreas que utilizam as UA, sendo de suma relevância a continuidade das pesquisas em prol do desenvolvimento contínuo de um Gerenciamento de Tráfego de Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas (*Unmanned Aircraft Systems Traffic Management - UTM*), definido como sendo um meio para a integração colaborativa entre humanos, informações, tecnologia, instalações e serviços, apoiados por capacidades de comunicações, navegação e vigilância a bordo, em terra ou baseados no espaço.

A figura 1 aponta o aumento das solicitações de voos no território nacional, considerando os mais de 94 mil cadastros de Pilotos no SARPAS. Em setembro de 2022 o número já se aproxima dos pedidos de 2021.

Figura 1: Solicitações por Ano



Fonte: SARPAS

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

De acordo com a ICA 100-40, de 1º de julho de 2020, os Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas, em inglês, *Unmanned Aircraft Systems* (UAS), são um novo componente da aviação mundial que operadores, indústria e diversas organizações internacionais estão estudando e trabalhando para compreender, definir e, finalmente, promover sua completa integração no espaço aéreo.

Os Drones, de maneira geral, se subdividem em três categorias: (i) Aeronave Remotamente Pilotada (ou *Remotely Piloted Aircraft* – RPA), (ii) Aeromodelos e (iii) Autônomos, sendo que a primeira já integra e interage (de forma acomodada) com o ATM.

Em matéria de segurança do espaço aéreo, buscam-se novas tecnologias de sistemas para prover o que a OACI chama de "Detectar e Evitar", tradução do termo *Detect and Avoid* (DAA), que, conforme o item 10.1.1 (Cap. 10) do Doc 10019, significa ter uma aeronave não tripulada "a capacidade de ver, captar ou detectar trânsito em conflito ou outros perigos e adotar as medidas apropriadas".

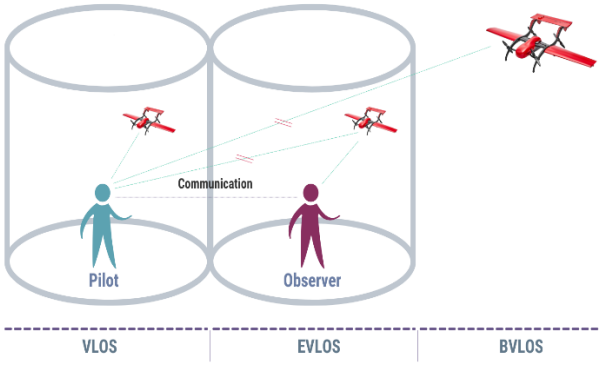
Embora essas aeronaves ainda não possuam requisitos técnicos suficientes que garantam a possibilidade do Detectar e Evitar, as porções do espaço aéreo se tornam corredores ou perímetros segregados para que as operações ocorram com segurança.

Nesse sentido, há de se falar dos principais tipos de operações previstos para os Drones no Brasil, que basicamente seguem premissas que envolvem a "linha de visada visual", ou seja, essas classificações se referem à situação na qual o Piloto Remoto se torna capaz de manter o contato visual direto com a aeronave.

Quando não é possível manter a UA no alcance visual, a operação é chamada de BVLOS (sigla de *Beyond Visual Line-Of-Sight*); se o alcance visual é permanente, a operação se configura como VLOS (*Visual Line-Of-Sigh*). Caso esse contato necessite de um Observador, chamar-se-á o voo de EVLOS, pois o alcance visual é estendido, ou seja, a sigla representa a expressão *Extended Visual Line-Of-Sight*, conforme a figura 2.

Esses termos são detalhados no decorrer da pesquisa, com as devidas demonstrações gráficas e epistemologias textuais pertinentes.

Figura 2: Tipos de Operações



Fonte: https://fixar.pro

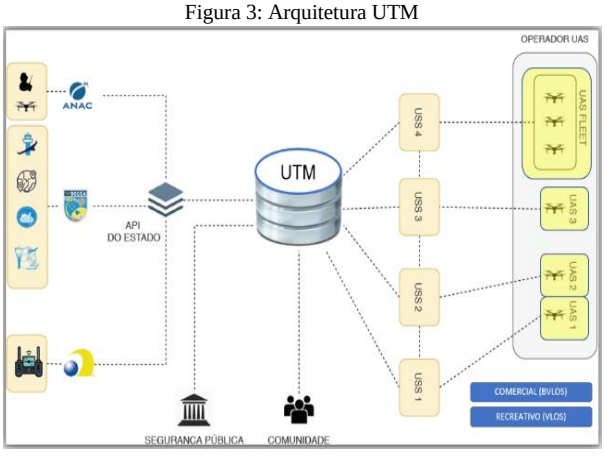
A partir dessa conjuntura, observa-se a necessidade de haver uma gênesis para que todo esse contexto seja possível, viável e seguro, ou, propriamente dito, o surgimento da concepção operacional do UTM Brasileiro.

3. QUESTÃO PROBLEMA

Com o desenvolvimento da pesquisa, pretende-se responder questões relevantes para o entendimento sobre o tráfego aéreo não tripulado na esfera da aviação brasileira, tais quais:

- As Autoridades de Aviação Civil e Aeronáutica e os Provedores de Serviços de Navegação Aérea (PSNA) são capazes de dispor de dados, em tempo real, acerca das intenções de voo e de quaisquer restrições nas porções do espaço aéreo brasileiro?
- É possível subsidiar a comunidade UAS com as informações necessárias para a manutenção de segurança por meio de um Provedor de Serviços de UTM (PSU)?

Figura 3: Arquitetura UTM



Fonte: DECEA

Como visto, a figura 3 representa uma arquiterura proposta pelo DECEA, sobre o UTM, reunindo os Órgãos Reguladores, a agregação de sistemas, as demandas dos usuários (separadas por finaldiades e perfis), os tipos de operações e, também, os provedores de serviços.

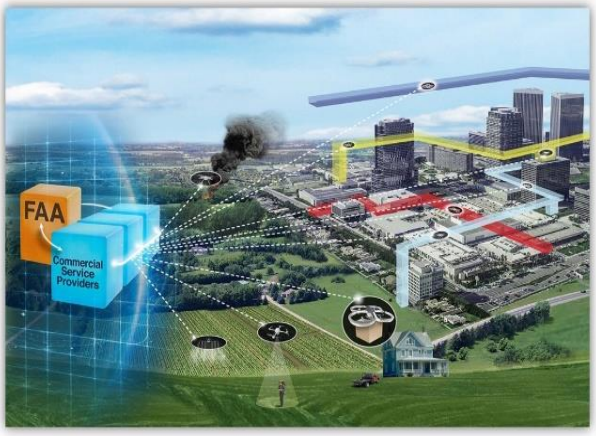
4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Segundo a DCA 1-1 "o Poder Aeroespacial Brasileiro é a projeção do Poder Nacional resultante da integração dos recursos de que a Nação dispõe para a utilização do espaço aéreo e do espaço exterior, quer como instrumento de ação política e militar quer como fator de desenvolvimento econômico e social, visando conquistar e manter os objetivos nacionais".

Considerando o avanço da aviação civil internacional fator precípuo para a promoção da cooperação entre os Estados, e que o conceito do UTM busca segurança contínua, justifica-se o desenvolvimento da pesquisa, que tende a apresentar possibilidades para a mobilidade urbana internacionalmente vislumbrada, sobretudo no tocante às operações de UA de baixa altitude, as quais deverão observar a avaliação dos riscos ambientais e de segurança como pressupostos para mitigação dos riscos.

Na figura 4, a seguir, representa graficamente a visão da *Federal Aviation Administration* (FAA), que contempla a aplicabilidade dos Drones em áreas povoadas, por tráfegos e rotas definidos pelo UTM, assim como o uso de aeronaves em diversas atividades laborais em áreas periféricas.

Figura 4: UTM e a Mobilidade Urbana



Fonte: FAA

5. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar o UTM como sendo a gênesis para a integração e escalabilidade dos Drones no espaço aéreo brasileiro, por meio de uma estrutura adequada, em que os Órgãos Reguladores, PSNA, PSU, Operadores, Exploradores e Pilotos Remotos possam compartilhar dados e informações da e para a mobilidade urbana.

E, no que se refere aos objetivos específicos, buscar-se-á:

a) Identificar as responsabilidades dos Órgãos Reguladores no que tange à supervisão da prestação dos serviços vinculados ao UTM e ATM;

b) Apontar os possíveis conflitos normativos entre as recomendações internacionais, dos Órgãos aos quais o Brasil é signatário, e as legislações brasileiras em vigor, de acordo com as áreas de atuação dessas agências;

c) Quantificar os voos que já foram solicitados no cenário da mobilidade urbana, identificando as medidas implementadas pelo DECEA como modelo de boas práticas em prol da viabilidade para as operações futuras; e

d) Identificar os requisitos de equipamentos, desempenho e processos definidos para as operações de UTM.

6. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O presente ensaio compila um projeto de pesquisa, em desenvolvimento pelos autores, e em nível de Doutorado, e consta inserido no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Ciências Aeroespaciais (PPGCA), da Universidade da Força Aérea (UNIFA).

Não obstante haja outras fontes e estudos acerca do tema Drones, e até mesmo sobre o UTM, em escala global, vislumbra-se apresentar uma construção inédita, baseada nas especificidades que envolvem a necessidade da criação desse gerenciamento no Brasil que, indiscutivelmente, se apresentará como uma pauta que permeia discussões éticas, educacionais, políticas, sociais, econômicas e técnicas.

Para a estruturação do trabalho, utilizar-se-á, como pressuposto metodológico orientador,

a pesquisa de natureza exploratória fundamentada numa abordagem qualitativa, com vistas à compreensão da complexidade e dos detalhes das informações coletadas.

Nesse sentido, a busca não há de ser apenas uma medição de um tema, mas a sua descrição em si, por meio de opiniões, impressões e pontos de vista técnicos.

De acordo com MINAYO (2000), [...] a atividade básica da Ciência na sua indagação e construção da realidade. É a pesquisa que alimenta a atividade de ensino e a atualiza frente à realidade do mundo. Portanto, embora seja uma prática teórica, a pesquisa vincula pensamento e ação.

Do mesmo modo, para Triviños (1987), o estudo descritivo tem como objetivo conhecer a realidade a partir da descrição de fatos e realidades. Esses autores serão os guias para a elaboração do desenho deste estudo.

Paralelamente, observa-se a necessidade de se utilizar os modelos e diretrizes também dispostos pela pesquisa quantitativa, já que a proposta será capaz de quantificar dados e números estruturados e estatísticos, formando-se, assim, a base para contribuir na conclusão da pesquisa.

7. CONCLUSÕES

Espera-se que os procedimentos metodológicos, utilizados no decorrer do estudo, sejam capazes de nortear a pesquisa no sentido da elaboração de um registro com informações coletadas e que, do mesmo modo, as estratégias de ação não se findem somente nas literaturas que estruturam o artigo, pois há de se buscar, em arquivos de outras instituições, de ensino, ciência e tecnologia, públicas e privadas, construções que possam subsidiar novas possibilidades.

Responder a questão problema é, sem dúvida, uma das finalidades do presente estudo, na medida em que a disponibilidade e o compartilhamento dos dados, informações e sistemas, em tempo real, devem ser garantidos, para que seja possível a atuação dos Órgãos Reguladores, PSNA, PSU, Operadores, Exploradores e Pilotos Remotos, num ambiente colaborativo de mobilidade aérea.

É preciso compreender que garantir os critérios exigidos e atingir os níveis de segurança, organização e sustentabilidade são requisitos imprescindíveis para que haja a interoperabilidade e integração almejadas.

Referências

BARRETO, Webert. Drones armados na guerra moderna: Existem regras no Brasil? Belo Horizonte: Editora Dialética, 2021.

BOWER, Joseph L.; CHRISTENSEN, Clayton M. Disruptive Technologies: Catching the Wave. Harvard Business Review, p. 43 - 53. 1995.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil. RBAC-E nº 94. Brasília, 2021.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Diretriz para implementação dos Comitês Regionais responsáveis pelos assuntos relacionados aos Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS). DCA 63-4. Rio de Janeiro, 2013.

____. Aeronaves não tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. ICA 100-40. Rio de Janeiro, 2020.

____. Aeronaves não tripuladas para uso exclusivo em apoio às situações emergenciais. MCA 56-1, Rio de Janeiro, 2020.

____. Aeronaves não tripuladas para uso recreativo – aeromodelos. MCA 56-2. Rio de Janeiro, 2020.

____. Aeronaves não tripuladas para uso em proveito dos órgãos ligados aos governos federal, estadual e municipal. MCA 56-3. Rio de Janeiro, 2020.

____. Aeronaves não tripuladas para uso em proveito dos órgãos de Segurança Pública, da Defesa Civil e de Fiscalização da Receita Federal. MCA 56-4. Rio de Janeiro, 2020.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira. DCA 1-1. Brasília, 2012.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. Diretriz de Implantação e Operação de Veículos Aéreos Não Tripulados no Espaço

Aéreo Brasileiro. DCA 55-36. Brasília, 2010.

BRASIL. Lei nº 7565, de 19 de dezembro de 1986. Código Brasileiro de Aeronáutica. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7565.htm> Acesso em 30 de agosto de 2021.

CANADA. International Civil Aviation Organization. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Doc 10019. 1st. ed. Montreal, 2015.

____. Unmanned Aircraft Systems Traffic Management - UTM. A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization. 3rd. ed., 2020. Disponível em: https://www.icao.int/safety/UA/Documents/UTM%20Framework%20Edition%203.pdf

____. Manual on Global Performance of the Air Navigation System. Doc 9883. 1st. ed. Montreal, 2008.

CHRISTENSEN, C. M. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail. Boston, Mass.: Harvard Business School Press, 1997

CROUCH, T.D. Asas, uma história da Aviação: das pipas à era espacial. São Paulo: Editora Record, 2008.

DOUGHERTY, Martin J. Drones: Guia das Aeronaves Não Tripuladas que Estão Tomando Conta de Nossos Céus. São Paulo: M.Books do Brasil Editora, 2019.

DOUHET, Giulio. La guerre de l'air. Paris: Journal "Les Ailes", 1932.

____. O domínio do ar. Rio de Janeiro: Belo Horizonte: Itatiaia; Rio de Janeiro: Instituto Histórico-Cultural Da Aeronáutica, 1988.

DUMONT, Alberto Santos. O que eu vi, o que nós veremos. Ed. Encantada. [S.l.: s.n], 1918.

HAMBLING, David. Swarm troopers: como os pequenos drones irão conquistar o mundo. Tradução: Paulo Baciuk – Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 2018.

JORGE, Higor Vinicius Nogueira. Drones, investigação criminal e segurança pública. São Paulo: Editora Juspodivm, 2022.

LAVENÈRE-WANDERLEY, Nelson Freire. História da Força Aérea Brasileira. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Gráfica Brasileira Ltda. 1975.

MINAYO, Maria Cecília de Souza. Ciência, técnica e arte: o desafio da pesquisa social. In: MINAYO, Maria Cecília de Souza (org). Pesquisa social: teoria, método e criatividade. Petrópolis: Vozes, 2000.

OLIVEIRA, Tânia Regina Pires de Godoy Torres de. O estudo da Guerra e a liderança militar brasileira (1996-2004). 2004. Tese (Doutorado em Educação). PPGE/UFSCar. São Carlos.

PARRET, Peter. Construtores da Estratégia Moderna. Biblioteca do Exército Editora. Rio de Janeiro, 2001.

PIMENTEL, Alonso Rodrigues. Operação de drones: responsabilidades, deveres e precauções dos operadores individuais e empresariais. Goiânia: Kelps, 2019.

RBAC-E nº 94. Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Agência Nacional de Aviação Civil. Emenda nº 01. 2021.

ROSA, Carlos E. Valle. Giulio Douhet e a Guerra Aérea na Síria. Revista Defesa e Segurança. V.2 (2016)

____. Poder Aéreo – Guia de Estudos. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Luzes, 2014.

SILVA, Eduardo Araújo da. A formação dos Controladores de Tráfego Aéreo na Aeronáutica: uma análise das Políticas Educacionais e suas práticas. 2018. 127f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação e Educação, Contextos Contemporâneos e Demandas Populares. Faculdade de Educação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TRIVIÑOS, A. N. S. Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987.

U.S. Federal Aviation Administration. Unmanned Aircraft System - UAS - Traffic Management - UTM. Concept of Operations. March 2, 2020.

ANÁLISE DO *PAVEMENT CONDITION INDEX* AEROPORTUÁRIO COM USO DE ESTATÍSTICA ESPACIAL

Antonia Fabiana Marques Almeida*, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

*** E-mail do autor de correspondência**: fabiana@det.ufc.br

PAPER ID: SIT138

RESUMO

O *Pavement Condition Index* (PCI) determina a condição funcional de um pavimento aeroportuário. Esse parâmetro é obtido por meio do levantamento de defeitos existentes na superfície das seções analisadas. A área total de análise é dividida em seções considerando o uso, o material e a condição. Assim, a hipótese é que esse índice apresente alguma estrutura espacial, uma vez que as seções têm informações agregadas com base em critérios bem definidos. Com base no exposto, este trabalho tem como objetivo verificar a autocorrelação espacial da variável PCI de pavimentos aeroportuários em caráter exploratório, determinando um padrão espacial de distribuição dos defeitos e fornecendo subsídios para previsão de valores. Para tanto, foram consideradas as informações de defeitos e do PCI calculado na pista de pouso e decolagem de um aeroporto brasileiro coletados em 2018. Foram testadas matrizes de ponderação de contiguidade e de distâncias, buscando identificar a que melhor se adequou aos dados analisados. Foi analisada a existência de autocorrelação espacial, por meio dos valores do I de Moran e utilizada a densidade do defeito mais recorrente nas seções avaliadas, o afundamento de trilha de roda com baixa severidade como variável explicativa do PCI. A regressão linear entre esses dois parâmetros resultou num coeficiente de determinação de 0,71. Também foram verificados os modelos espaciais autorregressivo e de erro, porém, nenhum foi significativo. Como indicadores de desempenho foram adotados o I de Moran, o critério de informação de Akaike e o log da máxima verossimilhança. Concluiu-se que, para o caso do conjunto de dados analisado, a regressão linear é mais eficiente na estimativa do PCI, porém, a estatística espacial pode ser utilizada para compreensão espacial das informações por parte do operador do aeródromo.

Palavras-chave: Pista de pouso e decolagem, Infraestrutura aeroportuária, *Pavement Condition Index*, Estatística espacial, I de Moran.

1. INTRODUÇÃO

A segurança das operações aéreas é de fundamental importância para a aviação civil. A infraestrutura aeroportuária, mais especificamente da área pavimentada, deve ser avaliada periodicamente. Essa sistemática permite que as atividades de manutenção e reabilitação (M&R) dos pavimentos sejam adequadamente planejadas e executadas com a melhor relação benefício-custo.

FAA (2014) prevê, como forma de avaliação da superfície de pavimentos aeroportuários, o uso do *Pavement Condition Index* (PCI), um importante índice para determinação de condição funcional. ANAC (2017) indica que o PCI é o método principal de determinação da condição funcional de um pavimento aeroportuário quanto à presença de defeitos, fornecendo uma base racional e objetiva para determinação das necessidades e das prioridades de M&R.

Para obtenção do PCI em pistas de pouso e decolagem (PPD), a área total a ser avaliada é dividida em seções, de acordo com idade, estado da superfície e defeitos existentes. É, então, realizado um levantamento de defeitos em cada região para o cálculo do PCI.

Como a PPD é dividida em seções que são vizinhas entre si, uma possibilidade de análise das informações obtidas é por meio da estatística espacial. Esse método permite verificar se existe autocorrelação espacial de uma variável numérica distribuída geograficamente. É possível identificar se as regiões vizinhas influenciam nos valores da região analisada e, em caso positivo, realizar estimativas e previsões dos valores de regiões próximas.

Nesse sentido, Kırbaş & Karaşahin (2017) analisaram o uso da vibração para determinar o PCI em rodovias, e obtiveram um modelo de regressão linear com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,85. Adeli *et al.* (2021) buscaram correlações entre o PCI e o Índice de Irregularidade Internacional (IRI), e identificaram que o modelo mais adequado foi o exponencial, com R^2 de 0,76 em rodovias rurais de qualidade considerada regular. Issa *et al.* (2022), por sua vez, utilizaram redes neurais artificiais para determinar o PCI de pavimentos rodoviários de forma mais rápida e objetiva.

Em pavimentos aeroportuários, Shahin & Becker (1984) utilizaram regressão não-linear com múltiplas variáveis independentes e obtiveram, para revestimento asfáltico, um R^2 de 0,83. Cereceda *et al.* (2022) estimaram IRI e PCI de aeroportos chilenos com base em processamento de imagens e encontraram correlações entre os dois parâmetros, com R^2 de 0,90 em uma regressão logarítmica.

Assim, o objetivo deste trabalho é verificar se há autocorrelação espacial da variável PCI na PPD de um aeroporto brasileiro em caráter exploratório. O intuito é definir se é possível determinar um padrão espacial de distribuição dos defeitos, fornecendo subsídios para estimativa de parâmetros como o PCI, por exemplo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Pavement Condition Index

A avaliação da condição funcional tem como objetivo a verificação da segurança e do conforto ao rolamento (ANAC, 2017). Vale destacar que o índice reflete a realidade do momento dos levantamentos, sendo possível utilizá-lo para previsões de desempenho quando são realizados periodicamente, gerando uma série histórica (Zakaria & Deni, 2020).

No Brasil, a forma de obtenção e o cálculo do PCI são descritos em ASTM (2020). É determinado após a inspeção visual de superfícies de pavimentos flexíveis ou rígidos.

A região a ser analisada é dividida em seções, com área máxima de 450 ± 180 m² em pavimentos em concreto asfáltico, ou 20 ± 8 placas contínuas em pavimentos em concreto de cimento Portland (ASTM, 2020). A quantidade de seções é variável, e deve permitir o cálculo do PCI a um nível de confiança de 95%.

O PCI considera o tipo (T_i), a severidade (S_j) e a densidade (D_{ij}) de defeitos ocorrentes no pavimento, e é amplamente utilizado como referência para manutenção. A severidade é dividida em baixa (B), média (M) e alta (A). D_{ij}, medida adimensional, pode ser calculada conforme a Equação (1).

$$D_{ij} = \frac{Defeitos\ (m^2)}{Área\ da\ seção\ (m^2)} \times 100 \qquad (1)$$

O PCI é calculado a partir da Equação (2), onde o *max(CDV)* (*corrected deduct value*) se refere ao valor máximo de dedução corrigido. O *CDV* é calculado conforme a Equação (3) (Wang *et al.*, 2019).

$$PCI = 100 - (CDV) \quad (2)$$

$$CDV = \left(q, \sum_{i=1}^{m_s} \sum_{j=1}^{n_j} f(T_i, S_j, D_{ij}) \right) \quad (3)$$

Onde,

m_s é o total de defeitos identificados;

n_j é o nível de severidade do defeito j;

$f(T_i,S_j,D_{ij})$ é a função do valor de dedução determinado pelo tipo de defeito T_i com o nível de severidade S_j e a densidade D_{ij};

q é a quantidade de registros com *CDV* maior que 5; e

$g(q,T_i,S_j,D_{ij})$ é a função do *CDV*.

Os tipos de defeitos listados no levantamento são: trincas (por fadiga, em bloco, longitudinais, transversais e de reflexão), exsudação, corrugação, depressão, erosão *jet blast*, deterioração por óleo, remendo, agregado polido, desagregação, afundamento de trilha de roda, solevamento, escorregamento, inchamento e desprendimento. O PCI varia de 0 a 100, conforme a escala do Quadro 1.

Quadro 1 Escala de classificação do PCI e tipo de reparo

Classificação	Limites	Reparo
Excelente	86 - 100	Manutenção preventiva
Bom	71 - 85	
Regular	56 - 70	Reabilitação
Ruim	41 - 55	
Muito ruim	26 - 40	Reconstrução
Péssimo	11 - 25	
Ruptura	0 - 10	

Fonte: Adaptado de ANAC (2017) e ASTM (2020).

2.2. Estatística Espacial

Considerando a disponibilidade de bancos de dados de PCI em pavimentos aeroportuários brasileiros, novas ferramentas são necessárias para a análise dessas informações de forma mais confiável. Quando os dados são georreferenciados, um método exploratório de análise é a estatística espacial (Anselin, 1996).

Nesse método são analisados atributos de regiões que podem apresentar dependência ou heterogeneidade espacial. Espera-se que regiões próximas apresentem correlação maior que regiões mais distantes (Golgher, 2015).

Essa correlação tem o intuito de verificar se o índice de uma região é afetado, ou não, pelo mesmo parâmetro de regiões vizinhas. É denominada autocorrelação espacial, calculado o I de Moran (Equação 4) que varia de -1 (indica dispersão) a +1 (indica agregação), sendo considerados melhores se próximos a esses limites. Essa medida estatística permite verificar se um parâmetro é agrupado, disperso ou aleatório.

$$I = \frac{n}{S_0} \times \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^{n} z_i^2} \quad (4)$$

Onde,

z_i é o desvio do atributo com relação à média $(x_i - \bar{X})$;

$w_{i,j}$ é o peso espacial entre i e j;

n é o total de regiões analisadas;

S_0 é a agregação dos pesos (Equação 5).

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} \quad (5)$$

O cálculo do I de Moran também está associado a uma inferência estatística cuja hipótese nula (H_0) é que o atributo em análise está distribuído aleatoriamente entre as regiões. Para o cálculo do I de Moran é necessário determinar as matrizes de ponderação espacial (W) que mais se adequam aos dados em análise.

Uma matriz W é do tipo quadrada, de tamanho n x n, composta pelos pesos espaciais ($w_{i,j}$) que representam o grau de conexão entre as regiões segundo algum critério de proximidade, permitindo identificar a influência da região j sobre a região i. Buscam refletir o arranjo espacial das interações resultantes do fenômeno a ser estudado (Almeida, 2012).

Determinar as matrizes é uma etapa arbitrária, pois não existem testes formais (Plaigin, 2009). As matrizes podem ser definidas

conforme a contiguidade e/ou com a distância geográfica. Nas matrizes de contiguidade duas regiões são vizinhas se partilharem de uma barreira em comum. As mais utilizadas são do tipo rainha (*queen*) ou torre (*rook*). A matriz *queen* considera vizinha a região que divide um vértice com a área a ser estudada. A matriz *rook*, por sua vez, considera vizinha a região que divide um vértice. Na matriz binária de contiguidade W, caso sejam consideradas vizinhas, $w_{i,j} = 1$, se não, $w_{i,j} = 0$.

Uma das matrizes W por distância geográfica mais utilizadas é a dos k vizinhos mais próximos (*k-nearest*), que também é do tipo binária. Aqui, $w_{i,j}(k) = 1$ se $d_{i,j} \leq d_i(k)$, e $w_{i,j}(k) = 0$ se $d_{i,j} > d_i(k)$, em que $d_i(k)$ é a menor distância para a região i a fim de que ela possua k vizinhos (especificados).

Existem outras matrizes W como a que considera a distância entre os centróides das regiões, a de pesos de Cliff e Ord, e outras. Essas matrizes não serão definidas neste trabalho, pois não serão utilizadas. Para definir a matriz W ideal, é selecionada a que gera o maior I de Moran.

Após identificada a matriz W, podem ser realizadas as verificações por regressão espacial, utilizando variáveis independentes de caráter explicativo. São identificados os erros da regressão, se atendem às premissas de normalidade, variância constante e distribuição aleatória. Após identificar as variáveis explicativas ideais, podem ser desenvolvidos modelos espaciais.

Os modelos espaciais mais utilizados são o SAR (*Spatial Autoregression*) e o SEM (*Spatial Error Model*), além da própria regressão (OLS – *Ordinary Least Squares*). Para definir se os modelos são válidos, são considerados o multiplicador de Lagrange (ML) (da distância – *lag*, e do erro – *error*) e o ML robusto (*lag* e *error*). A forma de identificar qual é o melhor modelo é por meio de algum indicador de desempenho, como o próprio I de Moran obtido da modelagem, o critério de Informação de Akaike (*Akaike Information Criteria* - AIC), ou o log da máxima verossimilhança (*Likelihood*).

3. MÉTODO DE PESQUISA

Este trabalho foi desenvolvido em 5 etapas: (i) Coleta e georreferenciamento de informações de PCI da PPD de estudo e análise descritiva dos dados; (ii) Determinação das matrizes de ponderação; (iii) Cálculo do Índice de Moran das variáveis analisadas; (iv) Regressão espacial com verificação das premissas nos erros obtidos referentes à: existência de normalidade, variância constante e independência espacial; e (v) Identificação do modelo espacial mais adequado.

Para a análise, foram utilizados os *softwares*: AutoCAD, versão 2020, para o esboço prévio das seções da PPD conforme informações obtidas do relatório oriundo do levantamento realizado; QGIS, versão 3.16.14, para criação do arquivo do tipo *shapefile* com as informações de análise; Jupyter Notebook (Anaconda), versão 6.3.0, para uso da linguagem Python (3.8.8) na confecção de gráficos; e GeoDa, versão 1.14.0, para a geração das matrizes de ponderação, verificação dos valores de I de Moran, análise da regressão linear e espacial e identificação do modelo espacial mais adequado aos dados pelos indicadores de desempenho (I de Moran, AIC e Log *Likelihood*).

Além do fator disponibilidade dos dados, o aeroporto de estudo foi selecionado pela homogeneidade no revestimento ao longo da PPD, que é em concreto asfáltico. Os levantamentos que resultaram nos dados analisados foram realizados conforme ASTM (2012) nos meses de agosto e setembro de 2018.

A avaliação do pavimento foi realizada de maneira contínua com a utilização do *Pavement Scanner* (Figura 1), que detecta e classifica automaticamente os defeitos. Para tanto, a PPD foi dividida em 27 seções. Os levantamentos foram executados com o tempo limpo e ventoso, com temperaturas médias de 25°C e a umidade relativa do ar média de 70%, de acordo com o relatório da empresa executora do serviço.

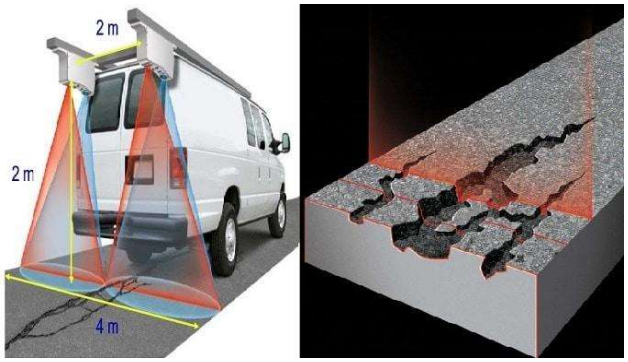


Figura 1 Exemplo de *Pavement Scanner* (Fonte: The Constructor, 2022).

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Coleta e caracterização dos dados

Os dados do aeroporto de estudo foram obtidos junto à empresa que executou o levantamento. A sua PPD apresentava, à época do levantamento, um comprimento pavimentado em concreto asfáltico de 2.545 m, largura de 45 m e orientação 13-31.

Os defeitos identificados nas seções foram: trincas por fadiga, depressão, trincas longitudinais e transversais, remendo, desagregação e afundamento de trilha de roda (ATR). Os mais frequentes foram a desagregação em baixa severidade e o ATR em baixa e média severidade.

A Tabela 1 apresenta de forma resumida a estatística descritiva dos dados de densidade (*D*) dos dois defeitos mais ocorrentes nas duas severidades citadas e do PCI. A Figura 2 apresenta uma espacialização dos valores de PCI calculados.

Tabela 1 Estatística descritiva dos dados de densidade dos defeitos e PCI.

Parâmetros	*Desagregação (B)*	$D_{ATR\ (B)}$	$D_{ATR\ (M)}$	*PCI*
Quantidade de ocorrências	19	22	18	27
Média	0,26	6,04	0,71	71,36
Mediana	0,19	6,46	0,51	63,34
Mínimo	0,03	0,18	0,02	51,93
Máximo	0,80	11,82	2,43	100,00
Desvio padrão	0,18	3,49	0,52	14,20
Variância	0,05	16,50	0,46	266,85
Coeficiente de variação	0,70	0,58	0,73	0,20

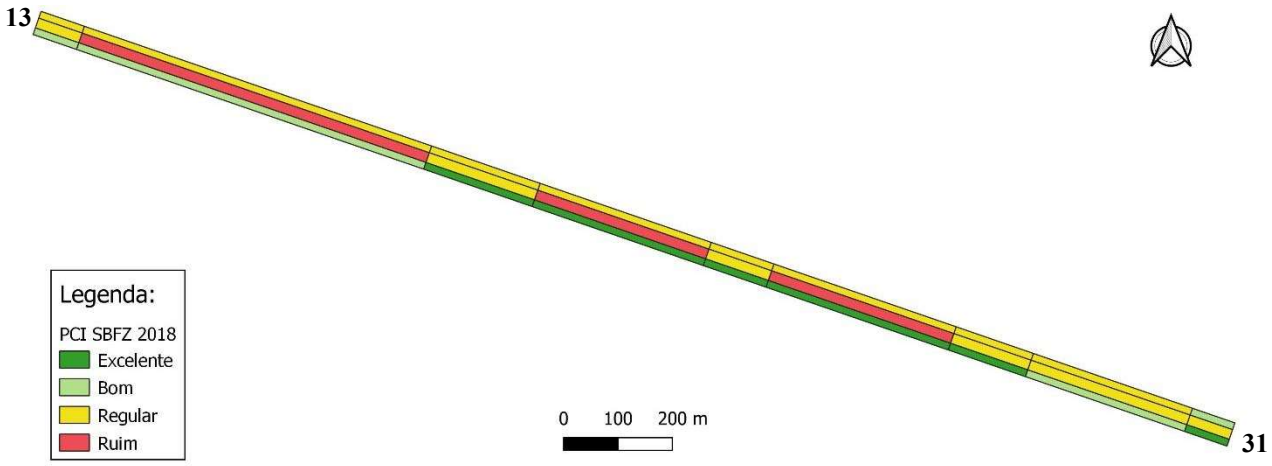


Figura 2 Classificação conforme PCI da pista 13-31 da PPD de estudo em 2018.

Ressalta-se que os defeitos foram considerados na forma de densidade na análise, por ser uma forma de normalização das variáveis para efeito comparativo. Pela Tabela 1 observa-se, que, embora os três defeitos citados tiveram maior ocorrência que os demais, não foram identificados nas 27 seções avaliadas.

Ainda da análise da Tabela 1, há também uma elevada variabilidade dos dados referentes

aos defeitos, como se verifica por meio do coeficiente de variação (*cv*). No caso da variável PCI, o *cv* é relativamente baixo, o que sugere uma homogeneidade dos dados.

Na Figura 2 pode-se verificar a distribuição conforme escala de avaliação dos valores de PCI. Não há um padrão bem definido, embora existam PCI classificados como “Ruim” em 3 seções da parte central da PPD: uma mais próxima à cabeceira 13, outra mais na região central, e a terceira entre a região central e a cabeceira 31. A Figura 3 apresenta um gráfico de linha dos dados de PCI e os limites inferiores das escalas de classificação do parâmetro, e a Figura 4 o *boxplot* dos valores de PCI também com a indicação dos limites inferiores da escala de classificação.

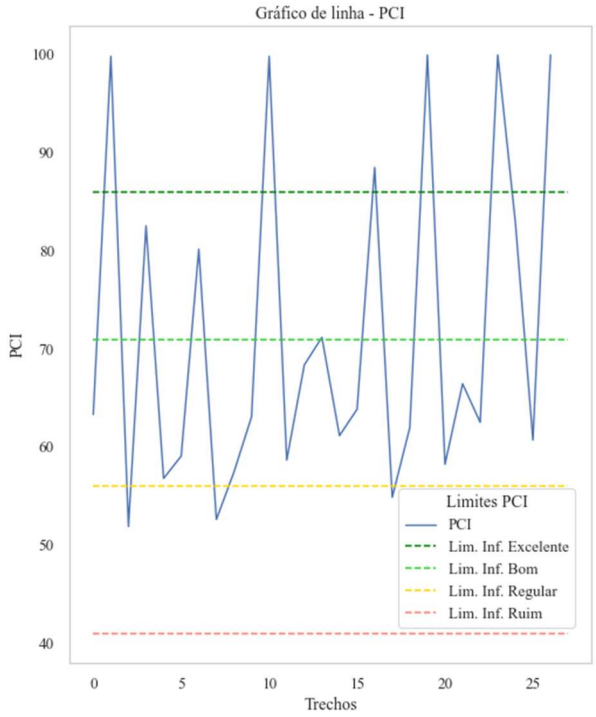


Figura 3 Gráfico de linhas dos dados de PCI da PPD de estudo em 2018.

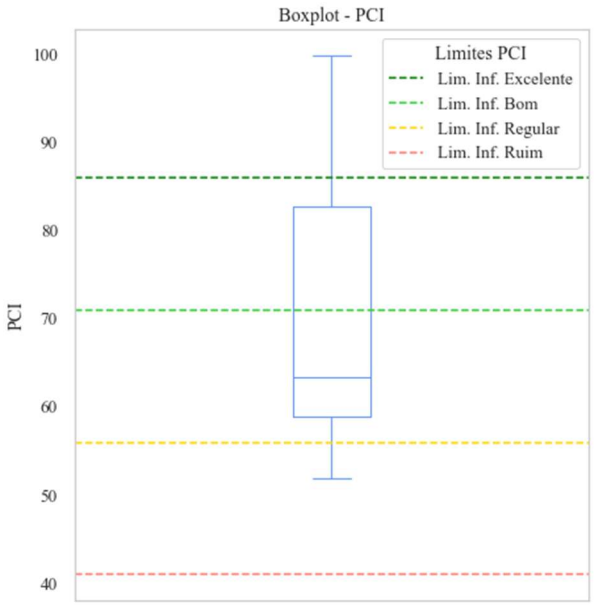


Figura 4 *Boxplot* dos dados de PCI da PPD de estudo.

Pela Figura 3 constata-se que não há uma distribuição padrão das informações, provavelmente pelo baixo tamanho da amostra. Pode-se verificar que poucas informações estão enquadradas na faixa classificada como ruim. A maior parte dos trechos (14) foi classificada pela escala como "Bom".

Quanto ao *boxplot* da Figura 4, constata-se que não há valores do tipo *outliers*. Confirma-se a presença de valores inferiores à média, e não há simetria de dados.

O parâmetro referente à densidade do ATR-B foi inserido na análise por ter sido o defeito mais frequente na PPD de estudo quando analisado, com o intuito de utilizá-lo como variável explicativa do PCI. A Figura 5 apresenta o *boxplot* da densidade do ATR-B. Verifica-se que há uma concentração de valores acima da média e que não há simetria dos dados de ATR-B. A regressão linear que considera o PCI como variável dependente, explicada pelo ATR-B resulta em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,71.

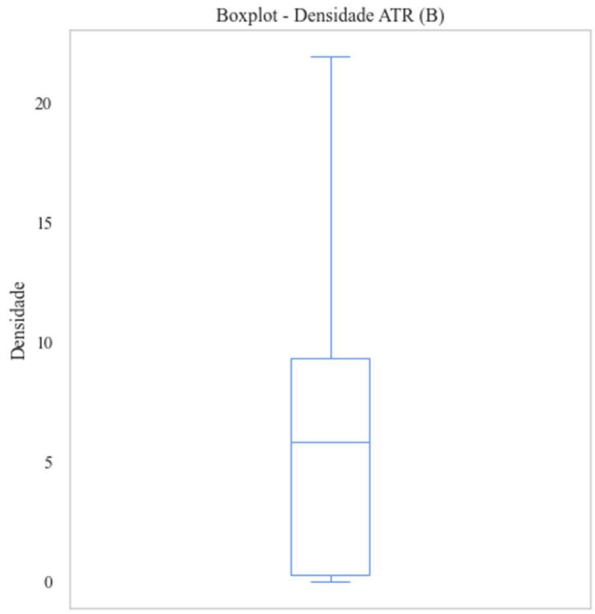


Figura 5 *Boxplot* dos dados de densidade do ATR-B da PPD de estudo.

4.2. Determinação das matrizes de ponderação

Para as matrizes de ponderação foram adotadas as de contiguidade *queen* e *rook*, além da matriz dos vizinhos mais próximos (*k-nearest*) com diferentes quantidades de vizinhos a serem considerados. A Tabela 2 apresenta algumas informações das matrizes de ponderação criadas para o cálculo da autocorrelação espacial. As matrizes *k-nearest* foram criadas considerando a quantidade máxima de 6 vizinhos mais próximos, já que foi identificado que a partir desse limite os valores de I de Moran estavam estabilizados.

Tabela 2 Matrizes de ponderação para análise.

Matriz	Número de Vizinhos
Queen	3 - 8
Rook	2 - 4
k-nearest 1	1
k-nearest 2	2
k-nearest 3	3
k-nearest 4	4
k-nearest 5	5
k-nearest 6	6

4.3. Determinação do I de Moran

O I de Moran foi determinado considerando as variáveis PCI e ATR-B. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3 I de Moran dos parâmetros de acordo com as matrizes de ponderação.

Matriz	PCI	ATR-B
Queen	0,030	-0,147
Rook	0,298	0,214
k-nearest 1	**-0,499**	**-0,802**
k-nearest 2	**-0,345**	**-0,408**
k-nearest 3	0,025	0,067
k-nearest 4	-0,067	-0,138
k-nearest 5	-0,146	-0,143
k-nearest 6	0,021	0,008

Dos valores da Tabela 3 observa-se que, para a variável PCI, o melhor valor do I de Moran (-0,499) ocorreu na matriz de ponderação *k-nearest* considerando um vizinho. Para o ATR-B o melhor valor do I de Moran ocorreu na mesma matriz de ponderação, porém o valor (-0,802) foi ainda mais próximo do limite considerado ideal.

Os valores com sinais negativos também expressam que a distribuição de informações ocorre de forma mais dispersa espacialmente. As figuras 6 e 7 apresentam os gráficos do I de Moran do PCI e da densidade do defeito ATR de baixa severidade (D_{ATR-B}), respectivamente, para a matriz de ponderação *k-nearest 1*.

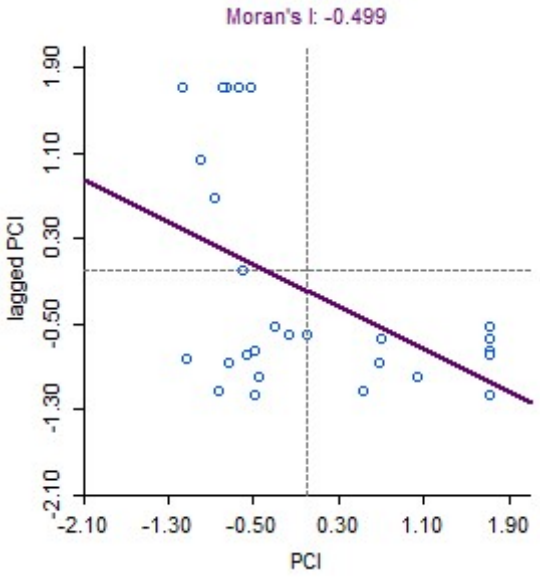


Figura 6 I de Moran do PCI (*k-nearest 1*).

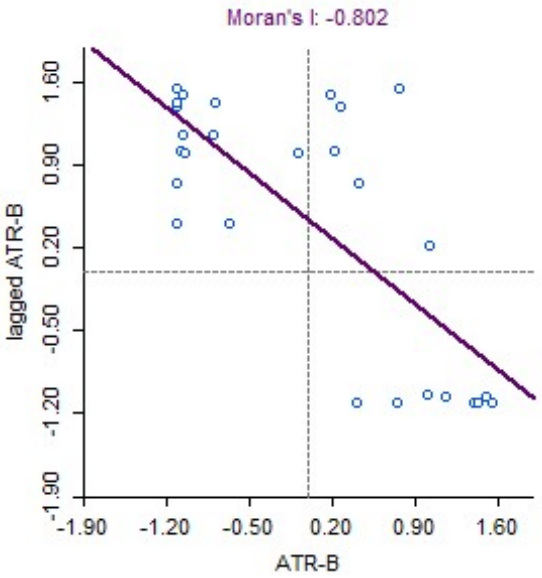


Figura 7 I de Moran da D_{ATR-B} (*k-nearest 1*).

Esses resultados mostram que, para uma divisão de seções na forma que o PCI demanda, a região em análise é influenciada por somente uma seção vizinha, considerando as variáveis analisadas. Porém, como não é possível realizar análise de modelos espaciais com a matriz *k-nearest 1* devido à quantidade de vizinhos ser mínima, será adotada a matriz *k-nearest 2*, que obteve os melhores resultados com maior quantidade de vizinhos. As figuras 8 e 9 apresentam os gráficos de dispersão do I de Moran do PCI e D_{ATR-B}, respectivamente, para a matriz *k-nearest 2*.

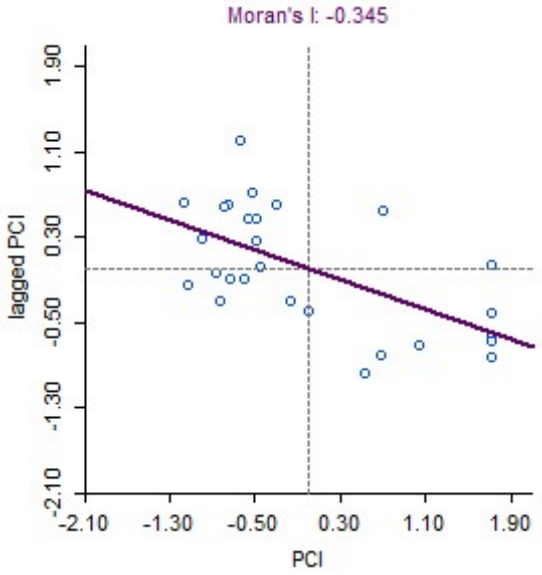


Figura 8 I de Moran do PCI (*k-nearest 2*).

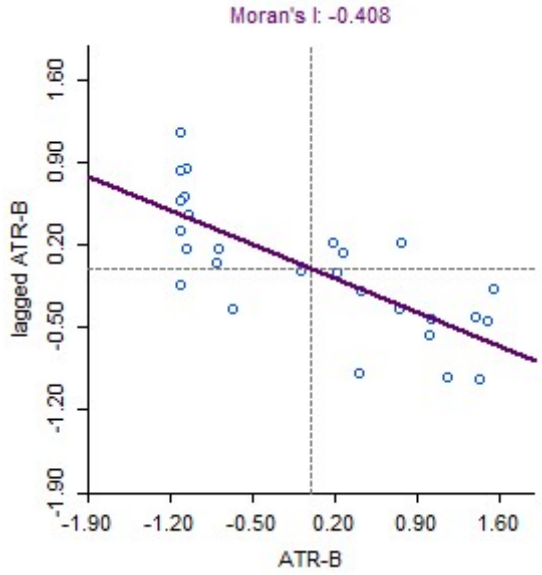


Figura 9 I de Moran da D_{ATR-B} (*k-nearest 2*).

4.4. Regressão espacial

Para verificar o desempenho da regressão espacial, em que a D_{ATR-B} é utilizada como variável explicativa do PCI, foi realizada uma estimativa de mínimos quadrados ordinários (MQO ou OLS). A variável explicativa, com p-valor de 0,00, pode ser definida como significativa, e assim é um indício de que é adequada para ser considerada.

A partir desta etapa, serão verificadas as premissas do modelo de regressão, com um nível de significância de 0,05. A Tabela 4 apresenta os resultados que não são influenciados pelas matrizes de ponderação.

Tabela 4 Resultados do diagnóstico dos erros da regressão espacial.

Teste	Verificação	p-valor	Premissa
Jarque-Bera	Normalidade	0,47	Atende
Breusch-Pagan	Variância	0,07	Não atende
Koenker-Bassett	Variância	0,01	Atende
White	Variância	0,01	Atende
I de Moran	Dependência espacial	0,76	Atende

Assim, com as premissas de normalidade, variância constante (apesar de um teste não ter atendido, mas pelos demais considera-se que a premissa foi atendida) e não dependência espacial atendidas, define-se que a variável D_{ATR-B} pode ser utilizada para explicar o PCI espacialmente. Embora isso seja esperado, por ser uma variável que é contabilizada na determinação do PCI, é

importante verificar a forma como ela pode ser empregada.

4.5. Modelos espaciais

Foram testados, além da regressão apresentada anteriormente, os modelos espaciais SAR e SEM. A Tabela 5 apresenta os resultados das probabilidades obtidas a partir desses modelos, considerando a matriz *k-nearest 2*.

Tabela 5 Resultados dos parâmetros de análise dos modelos espaciais.

Parâmetro	Valor	Probabilidade
ML (*lag*)	0,914	0,339
ML (*error*)	0,041	0,839
ML robusto (*lag*)	2,531	0,112
ML robusto (*error*)	1,656	0,198

Pelos valores de probabilidade, verifica-se que nenhum dos modelos foi significante. Os modelos foram calibrados, apesar de não serem significativos, para efeito comparativo com os dados oriundos da regressão. A Tabela 6 apresenta os resultados da calibração e os indicadores de desempenho considerando a regressão (OLS), o SAR e o SEM.

Tabela 6 Resumo dos modelos espaciais.

Parâmetro	OLS	SAR	SEM
Constante	86,941	93,026	86,917
ATR-B	-3,165	-3,033	-3,160
Rho (ρ)	-	-0,094	-
Lambda (λ)	-	-	-0,022
AIC	197,909	199,639	197,896
Log *Likelihood*	-96,954	-96,819	-96,948
I de Moran	-0,040	-0,429	-0,408

Os valores obtidos dos modelos, conforme Tabela 6, com exceção do I de Moran e dos coeficientes ρ e λ (inerentes dos modelos espaciais), foram muito próximos, principalmente ao analisar os indicadores de desempenho. Caso tivessem sido significantes, o SEM seria o ideal a ser adotado em estimativas espaciais considerando o AIC, ou o SAR, considerando o I de Moran. Como o modelo de regressão linear simples foi o único que apresentou significância, a Equação (6) apresenta como é a estimativa do PCI com base na densidade do ATR-B (D_{ATR-B}).

$$PCI = 86{,}941 - 3{,}165(D_{ATR-B}) \qquad (6)$$

Embora o resultado tenha indicado que o modelo simples é o melhor dentre os analisados, vale ressaltar que o PCI é um índice que considera muitos defeitos na sua formulação, o que pode ter afetado a análise. Assim, a Equação (6) poderia ser utilizada com caráter de tomada de decisão, identificando os momentos de alteração dos valores de PCI para realização de levantamentos mais completos.

5. CONCLUSÕES

A estatística espacial utilizada neste artigo permitiu realizar uma análise exploratória dos dados do *Pavement Condition Index* (PCI) de uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira. Verificou-se que a dependência espacial das variáveis analisadas apresentou um padrão mais disperso, mais evidente ainda quando se analisa a densidade do afundamento de trilha de roda de baixa severidade (D_{ATR-B}). Esse defeito foi considerado pois foi o mais ocorrente nas seções da PPD estudada.

O PCI, porém, é um índice que leva em consideração a existência de outros defeitos nas seções, embora possa ser explicado com base na D_{ATR-B} por meio de regressão simples com um coeficiente de determinação de 0,71. Vale destacar que essa estimativa deve ocorrer apenas para fins de apoio à tomada de decisão para identificar o momento em que se deve realizar novo levantamento de determinação do PCI ou intervir com as estratégias de manutenção e reabilitação mais adequadas.

Ao verificar a aplicação dos modelos espaciais, a matriz de ponderação que resultou nos maiores valores do I de Moran não foi adequada, uma vez que não é possível realizar a modelagem com somente 1 vizinho. Assim, a matriz de 2 vizinhos mais próximos (*k-nearest 2*), com os melhores resultados após a exclusão da anterior, foi adotada.

Os modelos espaciais autorregressivo e de erro não apresentaram significância. Assim, para efeito de modelagem, esses modelos podem não ser adequados para o caso analisado. O ideal é que a PPD fosse mais segmentada, pois facilitaria a análise espacial e, para tanto, é necessário que os defeitos sejam espacializados.

Referências

Adeli, S., Gilani, V. N. M., Novin, M. K., Motesharei, E., & Salehfard, R. (2021). Development of a Relationship between Pavement Condition Index and International Roughness Index in Rural Road Network. *Advances in Civil Engineering*. Volume 2021, 6635820. DOI: 10.1155/2021/6635820.

Almeida, E. (2012). *Econometria Espacial Aplicada*. Campinas, SP. Editora Alínea.

ANAC. (2017). *Manual de Sistema de Gerenciamento de Pavimentos Aeroportuários – SGPA*. Agência Nacional de Aviação Civil.

Anselin, L. (1996). The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association. *Spatial Analytical Perspectives on GIS*. Londres, Routledge, 268p. DOI: 10.1201/9780203739051.

ASTM. (2012). *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*. ASTM D5340-12. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.

ASTM. (2020). *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys*. ASTM D5340-20. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials.

Cereceda, D., Medel-Vera, C., Ortiz, M., & Tramon, J. (2022). Roughness and condition prediction models for airfield pavements using digital image processing. *Automation in Construction*. 139. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104325.

FAA. (2014). *Airfield Pavement Surface Evaluation and Rating Manuals*. Advisory Circular (AC) Nº 150/5320-17A. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration.

Golgher, A. B. (2015). *Introdução à Econometria Espacial*. 384p. Jundiaí. Paco Editorial.

Issa, A., Samaneh, H., & Ghanim, M. (2022). Predicting pavement condition index using artificial neural networks approach. *Ain Shams Engineering Journal*, 13. DOI: 10.1016/j.asej.2021.04.033.

Kırbaş, U., & Karaşahin, M. (2017). *Estimating PCI Using Vibration Data for Asphalt Concrete Pavements*. Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17) Barcelona, Spain. Paper No. ICTE 114. DOI: 10.11159/icte17.114.

Plaigin, C. (2009). *Exploratory study on the presence of cultural and institutional growth spillovers*. Brussels Economic Review. Working Paper, N°09-03. Research Series.

Shahin, M. Y., & Becker, J. M. (1984). Development of Performance Prediction Models for Airfield Pavements. *Transportation Research Record*. TRR 985.

The Constructor. (2022). Laser Crack Measurement System for Pavements. Disponível em: https://theconstructor.org/transportation/laser-crack-measurement-system-pavements/21081. Acesso em 30 de julho de 2022.

Wang, H., Guo, L., & Chen, X. (2019). *Airfield Pavement Management Framework using a Multi-Objective Decision Making Process*. Final Report. New Jersey: The State University of New Jersey.

Zakaria, S., & Deni, A. (2020). *Application of pavement condition index (PCI) on the assessment of the Kalumata highway section of the City of South Ternate*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. DOI: 10.1088/1755-1315/419/1/012016.

AN ONTOLOGY TO SUPPORT BRAZILIAN TRAFFIC FLOW MANAGEMENT BASED ON NASA's ATM REFERENCE MODEL

Luís Antonio de Almeida Rodriguez, José Maria Parente de Oliveira
Aeronautics Institute of Technology

rodriguezlaar@gmail.com, parente@ita.br

PAPER ID: SIT178

ABSTRACT

Time over the past two decades has shown different data models being introduced to try to standardize information for interoperability in the aviation domain. World's aviation organizations are rushing to maximize the efficiency of data exchange and actual initiatives like SWIM recommend the use of semantic knowledge descriptions to support air-traffic management information systems. The use of ontologies is increasing as a next step in aviation's data structures evolution, describing semantics (concepts, properties and relationships) and being conceived in machine-readable language, able to be accessed via programming languages. This paper presents an OWL-DL Ontology to support Air Traffic Flow Management based on NASA's ATM (Air Traffic Management) reference model. The original RDF files from NASA's release are the core of the implemented ontology, which was built to adapt NASA's taxonomy to Brazilian aeronautical laws and rules. Furthermore, the paper presents a set of experimental results which were carried out to manipulate the Brazilian customized ontology by using Python language and making CRUD (Create, Read, Update, and Delete) operations. In addition, the experiments show how to fill out and persist a flight plan form to simulate a pilot and an aeronautical information system interacting for a flight authorization.

Keywords: Ontology, NASA's atmontocore, machine-readable language, OWL.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank all the institutions involved in this work for their support: Aeronautics Institute of Technology - ITA, Air Navigation Institute (ICEA), Airspace Control Department (DECEA), and the *National Council for Scientific and Technological Development* – CNPq.

1 INTRODUCTION

The next generation of the worldwide air transportation system is an important subject of a lot of research by national airspace teams in several countries (SWIM, 2022). Civil aviation authorities all around the globe are rushing to integrate systems with the FAA (Federal Aviation Association) and Eurocontrol, two of the biggest ATM organizations. It is worthy saying that the use of reference models adopted by these two players is spreading among ATM software development teams.

The SWIM (System Wide Information Management) (SWIM, 2022) Program recommends the use of conceptual and logical models to be adopted by any system which must be integrated with this worldwide new reference model. One facet of this collaborative work among countries is to increase the information flow efficiency of all airlines operations to facilitate the whole civil air transportation network. Brazilian aviation authorities are also running to integrate their ATM systems to this new age (DECEA, 2022).

The lack of the adoption of a single formal data exchange model by world's aviation is holding back its ATM systems integration (ICAO, 2022). Different data models must be translated by software to share information and the Ontologies are the artifacts which can enable a shared understanding, using a formal way (OWL, 2022) to build semantic descriptions which can be used as machine-readable knowledge cores by ATM systems.

The lack of a formal data exchange model to describe the Brazilian Traffic Flow Management domain is a problem since it is an obstacle to integrate air-traffic operations systems with those two important ATM players. Thus, it is too expensive for Brazil and FAA or Eurocontrol to exchange data by software. The goal of this work is to present an implementation of OWL-DL (OWL, 2022) ontology based on NASA's ATM reference model (NASA, 2022) to serve as a formal data exchange model to Brazilian ATM systems.

This paper is organized as follows: Section 2 presents NASA's ATM ontology and a related paper which presents a direct comparison between NASA's and the Eurocontrol ontology. Section 3 presents the ontology development and Python experiments of querying and executing CRUD operations in the ontology, aiming to validate functional requirements and the purpose of the ontology. Section 4 presents contributions, a brief conclusion and further works.

2 NASA's ATM ONTOLOGY AND A RELATED WORK

NASA's ATM Ontology is a conceptual model which is implemented and released by a work group representing FAA, NASA and some Industry organizations using the machine-readable languages OWL, RDF and RDFS (W3C, 2022). It defines classes of entities and their respective relationships considering (NASA, 2022) the United States National Airspace System (NAS) and the management of the air-traffic domain.

A huge number and variety of entities which are directly related to that domain is represented, including classes corresponding to *flights, flight plans, aircraft, airports, weather conditions* and many others. The ontology has become useful since it describes a variety of information relevant to ATM operations in a generic mode, considering information exchange, data query and semantic search, integration and the information standardization.

NASA's motivation to develop this artifact was (NASA, 2022) the need to integrate heterogeneous forms of aviation data for aeronautical research applying semantic integration techniques. The ontology is released as six different files with the "*.owl*" extension: *ATM.owl, NAS.owl, general.owl, equipment.owl, data.owl* and *atmontocore.ow*l. The ontology serves as a common source of structured knowledge which can also be a formal vocabulary to allow data exchange using machine-readable language.

Data coming from multiple sources can be transformed into ATM Ontology instances (NASA, 2022) and can be loaded into a triple store (data organized as subject, predicate, and object) which can be queried and the results can serve a specific purpose. NASA's Ontology is formatted and implemented as a set of RDF (Resource Description Framework) files using the basic knowledge of OWL (Web Ontology language), RDF and RDFS (Resource Description Framework Schema)(W3C, 2022).

The set of descriptions is organized into eight major sections which describe thematically-related sets of classes. Each one of these is described in its own subsection: *Airspace Structures and Facilities; Navigation: Routes, Fixes, Arrival and Departure Procedures; Traffic Management Initiatives; Operations: Flight, Carrier and Aircraft; Airport and Surface Operations; Weather; Sequences, Sub-sequences, Sequenced Itens.*

The organization, specification and the ontology development were headed by a group of organizations including NASA and FAA, which gave the ontology the nickname "*beauty"*. The entire set of *.rdf* files can be downloaded at NASA's web page and it is open-source for academic purposes (NASA, 2022).

Gringinger et al. (Gringinger, 2020) have presented a comparative evaluation between NASA's ATM (ATMONTO) and the Eurocontrol ontology AIRM-O, derived from the ATM Information Reference Model (AIRM) (AIRM, 2022). The authors have established a comparative mapping between those artifacts in an effort to capture the concepts and semantic relations which could be common.

Such a work presents a deep evaluation made on both ontologies by a team of six human experts and some automated tools. These experts were of two types: the ones who were pilots and ontology experts and the others who were only ontology experts, providing this a fair condition to evaluate the artifacts. The experts have mapped the concept terms from ATMONTO to AIRM-O while indicating the degree of match using a very simple categorical scale. After evaluating the scale of the match among the experts, they produced another evaluation comparing both ontologies again using automated general-purpose ontology matching tools.

Both automated and manual results show there are a lot of differences in the terms presented by both ontologies, for example, the entity *runway* is described on the ATMONTO using only five different metadata and AIRM-O implements more than twenty entities to present the description of the same object.

Those authors have made a huge effort to provide a way to have some kind of harmonization between the United States and European aviation and they have concluded it is not so simple and it has to be done by several-country teams.

3 ONTOLOGY DEVELOPMENT AND PYTHON EXPERIMENTS

Ontology Development

The idea was to focus on the problem: - *the lack of a formal data exchange model to integrate Brazilian ATM information systems with FAA and Eurocontrol through SWIM.* So there is a need to develop a Brazilian Formal Air Traffic Flow Management Reference Model. To develop the ontology, the authors used the approach presented in (Ron & Smith, 2016) and as the technological solution to implement this model as an ontology, using the Web Ontology Language (OWL, 2022).

The purpose of deciding about the OWL language was to follow SWIM specifications (SWIM, 2022) which use this machine-readable language to represent the ATM domain. NASA's and Eurocontrol's artifacts also use this language (Gringinger, 2020). The first step of ontology development (Ron & Smith, 2016) was: "*to identify the primary tasks the ontology will be designed to be able to realize and the essence of its Domain."*

Table 1 - Competency Questions (CQ)

cq1	Is there an entity related to each of all the required fields of the Brazilian Abbreviated Flight Plan Form?
cq2	Can I create an instance for each of all those fields and fill & persist a complete FP Form as an. owl file with a specific name?
cq3	What is the Flight Plan of a specific *Pilot_In_Command* ?
cq4	Can I re-open the named and persisted ".owl" file and am I able to manipulate it?
cq5	Can I list the filled fields of the form?

In this case the authors have implemented a set of *Competency Questions* (CQ) (Potoniec, 2020) to define the Functional Requirements to implement the ontology. As in Table 1, CQ are artifacts destined to define the questions that must be answered by the ontology to validate it and it was built to guide the authors to customize NASA's taxonomies to adapt all the entities and business rules of Brazilian Aviation

laws contained in MCA 100-11 – (*Manual do Comando da Aeronáutica)* (MCA 100-11, 2022). The **Flight Plan Forms** were used as a use case into the Brazilian ATM domain and Table 1 presents the set of CQ and they are going to be validated using Python experiments.

After a set of functional requirements have been specified, the next step was (Ron & Smith, 2016) : *"to identify and evaluate existing ontologies with overlapping domains. Reuse as far as possible the ontology content which satisfies the defined requirements."*

The authors carried out a mapping between those described in the Brazilian Abbreviated Flight Plan Form (MCA 100-11, 2022) and the set of entities described by NASA's ontologies. The goal was to find possible matches between the two different sets of descriptions considering OWL Classes, Object Properties or any other stereotype offered by the language and used in NASA's files and make a complementary entities creation to customize the original ontologies to the Brazilian domain. NASA makes available a manual to describe all the entities of its ontology (NASA, 2022).

Three types of matching terms were considered (Gringinger, 2020):

- **Total Match** - when the Brazilian term of the flight plan form is exactly like a specific term contained in the original NASA's taxonomy. In this case no new entity is created and NASA's original OWL type is used to represent the form field.
- **Partial Match** - when the Brazilian term is similar but has some specific difference in its essence. In this case the authors created an inheritance relationship and a subclass of the original term in NASA's file is created with a specific name to match the Brazilian term.
- **Zero Match** - when there is no term in the original ontology which is at least similar to the Brazilian one. In this case a new term was created as a root Class or Property in the TFM_BR ontology.

Figure 1 presents some of the job of mapping Portuguese terms from MCA 100-11 form, their respective translations and NASA's closest match entity after the comparisons. It also presents an example of *Zero Match* with the "*Número"* cell, which is translated and defined into its essence, but there is no term in NASA's taxonomies which could define this one.

After the mapping job the next step was (Ron & Smith, 2016): "*to arrange the whole set of defined terms to form a backbone is-a hierarchy, in the sense each node at a level which is lower than the root level is connected by a single is-a link to its parent node. The ontology must guarantee a single inheritance."*

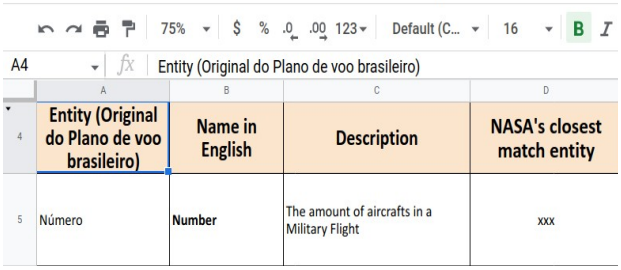


Figure 1 A cut of the terms mapping between Brazilian Flight Plan Form and NASA's terms

The authors took into consideration the results of the mapping task to define all the entities which would fit into NASA's taxonomy to provide the customization of entities and relationships among them to Brazilian aeronautical laws and rules. So, a new empty ontology was created using the software Protegé (Protegé, 2022) with the name **TFM_BR** (Traffic-Flow Management BRAZIL).

The idea about TFM_BR's core was to import NASA's *atmontocore* architecture as presented in Figure 2. The essence of the proposed ontology is to use NASA's definitions without any direct change on the original files. The OWL language has a native stereotype called "*import"* (OWL, 2022) which allows a single ontology to make use of the taxonomy of several other ones just by literally importing them in its code.

Importing the whole set of NASA's files made it possible to use the taxonomy of all its ontologies without making changes on any entity of the original implementation, at the same time it was easy to create new entities into the new ontology to fit the domain definitions to Brazilian features.

As shown in Figure 2, to implement NASA's files, we used the stereotype *Import* of OWL 2 to capture the whole set of NASA's ontologies taxonomy and axioms. Each entity described in red in Figure 2 represents one

ontology, which means one specific *.owl* file of NASA's last release (NASA, 2022).

To complement this import, a set of new entities based on the term mapping job was created to support the specific features of the Brazilian *Abbreviated Flight Plan Form* exactly as it is described by official authorities (MCA 100,11, 2022), as shown in Figure 3. The new entities are presented in Figure 4 in **bold** letters and having a "**_BR**" at the end of their ID, to identify the set of non-imported objects.

<**Import**>http://THE_project.com/Ontologies/NASA_atmontocore/NASA_OwlFIles_owl_xml/ATM</**Import**>
<**Import**>http://THE_project.com/Ontologies/NASA_atmontocore/NASA_OwlFIles_owl_xml/NAS</**Import**>
<**Import**>http://THE_project.comt.com/Ontologies/NASA_atmontocore/NASA_OwlFIles_owl_xml/atmontoCore</**Import**>
<**Import**>http://THE_project.com/Ontologies/NASA_atmontocore/NASA_OwlFIles_owl_xml/data</**Import**>
<**Import**>http://THE_project.com/Ontologies/NASA_atmontocore/NASA_OwlFIles_owl_xml/equipment</**Import**>
<**Import**>http://THE_project.com/Ontologies/NASA_atmontocore/NASA_OwlFIles_owl_xml/general</**Import**>

Figure 2 Importing NASA's ontologies to TFM_BR

Each entity (field) of the form in Figure 3 was implemented in the TFM_BR ontology exactly as its meaning and considering the matching level it was classified and Brazilian business rules. The final position of all terms in NASA's taxonomy was defined considering the result of the terms mapping.

Anexo B - Formulário de Plano de Voo Simplificado

FRENTE

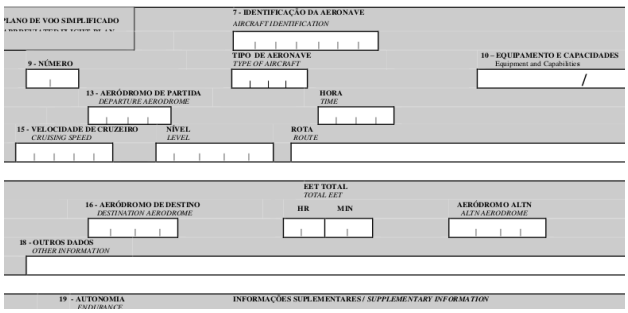


Figure 3 A cut of the Abbreviated Flight Plan Form (MCA 100 - 11, 2022)

Figure 4 presents Protegé and the set of **bold** classes which were created as the result of the positioning of the new terms into their specific hierarchies and meanings at the original taxonomy of NASA's ontology. The non-bold entities are from the original implementation. The Brazilian ontology includes also a set of instances (owl Individuals)(OWL, 2022) pertaining to the ANAC_CODE Class, which define a unique code for each pilot or any other crew member.

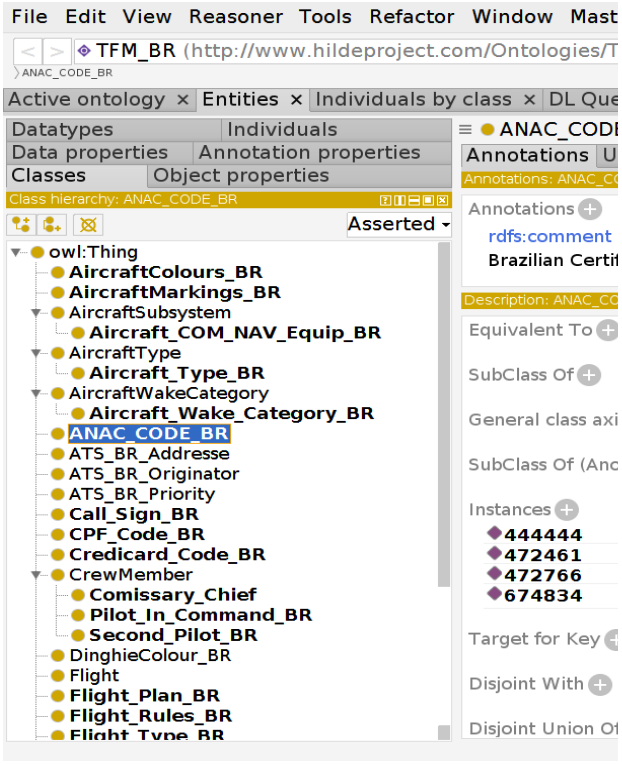


Figure 4 A cut of Protegé screen and the new classes of TFM_BR in bold

The following step was the creation of another set of instances which would serve as parameters to be used by the authors to make CRUD operations *(Create, Read, Update and Delete)* over the TFM_BR ontology during the tests, as presented in the right side of Figure 4.

The new ontology can be seen as the semantic description which serves as an core to carry knowledge which allows a developer to encapsulate it with a software and interact with common airman users to satisfy their real life goals making use of this artifact as a service.

The ontology implementation was completed and the authors were ready to start the Python experiments destined for ontology validation (Potoniec, 2020).

- *Python Experiments*

The idea to present Python experiments is focused on reaching the ability to manipulate ontologies via Python executing CRUD operations and use it to build software based on this kind of semantic representation. The difference from other software is that all CRUD

operations are made by using semantic objects described by the stereotypes of OWL language, not *strings*, *enumerations*, *integer* or any type defined by programming languages.

The goals of Python experiments were:

- Program queries to be executed in the TFM_BR ontology using the owlready2 Python library (OWLREADY 2, 2022) to make searches whose results could answer and validate the CQ in Table 1.
- To create a clone of the ontology TFM_BR using Python and to fill out all the components of the Abbreviated Fight Plan Form (Figure 3) with specific data to simulate a pilot asking for a Flight Plan authorization and filling a Web form.

After the simulation is finished, the ontology file which describes that specific filled Flight Plan Form must be persisted into a *file system* with the *.owl* extension and must be re-opened at any further moment for legal purposes.

All the CQ were considered as the basis to program Python queries to provide the necessary answers. The ability to import other ontologies taxonomies offered by the library owlready2 is defined as (OWLREADY2, 2022): *from owlready2 import* * and it will be omitted on the code descriptions. The Python code solutions for the CQ (Table 1) are:

- **cq1** - asks for the list of all Brazilian entities mapped and inserted into NASA's taxonomy. Table 2 presents a Python script which extracts and prints the list of new implemented Classes, Object Properties and Individuals from the TFM_BR implemented ontology:

Table 2 - Python script for cq1

```
onto = get_ontology("http://www.deproject.com/Ontologies/TFM_BR_and_FlightPlan_Models/TFM_BR.owl")#download from an http address on the internet
onto.load()#puts ontology in RAM memory
onto.classes()#list Classes
onto.object_properties()#list Object Properties
onto.individuals()#list Instances (Individuals)
# or (another way to do it)
print(onto.search(iri = "*_BR"))#search for the new entities
```

The shell result after running this script is presented in Table 3. It is possible to see the reference "*_BR*" at the end of all of the non-imported entities.

Table 3 - Python shell result for cq1

[TFM_BR.AH_2, TFM_BR.AS_350, TFM_BR.AT_27, TFM_BR.Boeing_737_800, TFM_BR.Boeing_787_800, TFM_BR.C_95, TFM_BR.C_99, TFM_BR.F_5, TFM_BR.F_5M, TFM_BR.TFM_BR.WakeCategory_BR_M]
[TFM_BR.AircraftColours_BR, TFM_BR.AircraftMarkings_BR, TFM_BR.Aircraft_COM_NAV_Equip_BR, TFM_BR.Aircraft_Type_BR, TFM_BR.Aircraft_Wake_Category_BR, TFM_BR.Brazilian_Airport_BR, TFM_BR.CPF_Code_BR, TFM_BR.Call_Sign_BR, TFM_BR.Credicard_Code_BR, TFM_BR.DinghieColour_BR, TFM_BR.Flight_Plan_BR, TFM_BR.Flight_Rules_BR, TFM_BR.Flight_Type_BR, TFM_BR.Pilot_In_Command_BR, TFM_BR.Second_Pilot_BR, TFM_BR.Waypoint_BR, TFM_BR.anac_code_CPF_BR, TFM_BR.filledBy_BR, TFM_BR.hasACFTColours_BR, TFM_BR.hasACFTMarkings_BR, TFM_BR.hasAircraftType_BR, TFM_BR.hasAnacCode_BR, TFM_BR.hasCOM_NAV_Equip_BR, TFM_BR.hasCpf_BR, TFM_BR.hasDinghieCoverColours_BR, TFM_BR.hasFillingDay_BR, TFM_BR.hasFlightDay_BR, TFM_BR.hasFlightType_BR, TFM_BR.hasFlight_Rules_BR, TFM_BR.hasNASDay_BR, TFM_BR.hasPilotInCommand_BR, TFM_BR.hasWaypoint_BR, TFM_BR.has_ATS_BR_Addresse_BR, TFM_BR.has_ATS_BR_Originator_BR, TFM_BR.has_ATS_BR_Priority_BR, TFM_BR.has_Call_Sign_BR, TFM_BR.isA_2nd_Alternative_Aerodrome_BR, TFM_BR.isA_GPS_Fix_BR, TFM_BR.isA_NDB_Fix_BR, TFM_BR.isA_TACAN_Fix_BR, TFM_BR.isA_VOR_Fix_BR, TFM_BR.isAn_Airport_BR, TFM_BR.isAn_Alternative_Aerodrome_BR, TFM_BR.aircraft_Fuel_Flow_BR, TFM_BR.airlineSerialNumber_BR, TFM_BR.cruisingAltitude_BR, TFM_BR.cruising_speed_BR, TFM_BR.emergencyRadioCom_BR, TFM_BR.emergencyRadioCom_UHF_243_0_BR, TFM_BR.emergencyRadioCom_VHF_121_5_BR, TFM_BR.personName_BR, TFM_BR.personPassword_BR, TFM_BR.personSignature_BR, TFM_BR.totalEstimatedEnrouteTime_BR]

Table 3 presents the short *IRI* (OWL, 2022) of the results of the actions: to *import* owlready 2 library, to *download* the TFM_BR ontology using a HTTP address as parameter, to put TFM_BR in *RAM memory* and then it will

be able to be manipulated by operating any CRUD operation. After that, the code presents queries about the whole set of owl entities which were created as the result of the term mapping job and the insertion into NASA's taxonomy. It is possible to observe that there is a huge set of different owl types like *Classes*, *Object Properties* and *Individuals* presented in Table 3.

- **cq2** asks to fill out the Flight Plan Form items and to persist it. For a matter of available space, the authors reduced the number of items to simulate the form. The selected items are the following: *Flight Plan*, *Pilot-in-command*, *Call Sign*, *Departure Airport*, *Arrival Airport*, *Alternative Airport*, *Planned Route*, *ANAC_CODE*, *Aircraft Wake Category*, *People on Board* and *Total Endurance*. Python code is presented in Table 4 and Table 5:

Table 4 - Python code for cq2

```
onto = get_ontology("http://www.deproject.com/Ontologies/TFM_BR_and_FlightPlan_Models/TFM_BR.owl")#download from http
onto.load()# put the file in RAM memory
onto.save("/home/rodriguez/Desktop/SITRAER_2022.owl")#persist in filesystem with this name
onto2 = get_ontology("///home/Desktop/Only_Dev_CodigoFonte/SITRAER_2022_PlanoDeVoo_Ontologia_15_Agosto_2022.owl")#download from filesystem
onto2.load()#puts filesystem's ontology in RAM memory
```

Table 4 presents the download of the TFM_BR from a HTTP address and the allocation of this model in *RAM memory*, the persistence of an instance (an instance is the same file "saved as" another name) of TFM_BR with a specific name. After that the original ontology from the internet is destroyed because it serves as a generic model and should not be modified. A specific instance of the internet ontology must be saved as another "*.owl*" file and with another name to identify the file in a history backup. The same process to download and put the new file in *RAM memory* is presented with the *onto2* variable getting the file from the *Desktop* to be able to manipulate the correct persisted file.

The *onto2* variable in Table 4 now is able to allow CRUD operations and the next step was to create the instances and relationships among them to simulate a pilot filling those items from Figure 3 to get a flight plan authorization. Table 5 presents the python code to define the values of those fields being filled by a pilot and their relationships to the related Flight Plan.

Table 5 - Python code for cq2

```
filesystem = get_ontology("/home/rodriguez/Desktop/Only_Dev_OWL_TEMP_Files/Teste_Ontologia_SITRAER_20_Ago.owl").load()
fp = filesystem.Flight_Plan_BR("F_P_SITRAER")
codigo_anac = filesystem.ANAC_CODE_BR("888888")
piloto = filesystem.Pilot_In_Command_BR("Bruce Dickinson")
codigo_chamada = filesystem.Call_Sign_BR("Flight_MAIDEN")
depAirp = filesystem.search(iri = "*SBGL")
arrvAirp = filesystem.search(iri = "*SBNT")
alterAirp = filesystem.search(iri = "*SBRF")
route = filesystem.search(iri = "*SJC_SITRAER")
aircraft = filesystem.search(iri = "*787")
radio = filesystem.search(iri = "radio*")
cod_ANAC = filesystem.search("*472461")
wake_cat = filesystem.search("*BR_J")
endurance = 04.50
pob = 130
fp.hasPilotInCommand_BR = [piloto]
fp.hasDepartureAirport_BR = [depAirp]
fp.hasArrivalAirport_BR = [depAirp]
fp.hasAlternateAirport_BR = [depAirp]
fp.hasCall_Sign_BR = [Flight_SITRAER]
fp.hasPlannedRoute_BR = [route]
fp.hasCOM_NAV_Equip_BR =[radio]
piloto.hasANAC_CODE_BR = [cod_ANAC]
aircraft.hasWakeCategory_BR =[wake_cat]
fp.hasPeopleOnBoard_BR =[pob]
fp.hasTotalFlightEndurance_BR = [endurance]
filesystem.save("/home/rodriguez/Desktop/Only_Dev_OWL_TEMP_Files/Teste_Ontologia_SITRAER_20_Ago.owl")#re-writing on file system
```

Table 5 presents the creation of a set of instances and relationships among them which represent all the fields of the Abbreviated Flight Plan Form (Figure 3). The process to create data and metadata is similar to what a regular information system is programmed to do. When a user fills form fields on a Web page, the system captures text on a screen and persists on a database as a primitive data type OWL, 2022). The authors have transformed text into semantic knowledge, able to be identified as a precisely defined object, with a specific meaning and ID and inserted into a previously defined taxonomy, becoming a semantic entity existing

on a semantically defined domain. Table 5 presents the download of the ontology that was in the file system; it is put in RAM memory and manipulated to create Individuals and triples among them (OWL, 2022).

The legend:

- Brown - Python variables to support the owlready2 methods.
- Black - owlready2 methods.
- Purple - OWL Individuals
- Orange - OWL Classes
- Blue – OWL Object Properties
- Green – OWL Datatype Properties values

It is possible to observe that the code in Table 5 associates all different metadata to the specific instance of Flight_Plan_BR. It is a *1 to N* relationship to refer all the fields on the Flight Plan Form (Figure 3) to a unique reference of a Flight Plan, the *Individual* F_P_SITRAER. The code simulates the whole process: to fill the form, to process and to persist the owl file in the file system to make a documents history. It is possible to observe that the owlready2 library mixes OWL elements with Python variables to execute CRUD operations over the ontology.

Triples are represented in Table 5 by a Brown - Blue - Brown line. These lines associate two python variables and this code creates a triple between two OWL instances, or, two OWL *Individuals* to establish a meaningful relationship, which describes business rules and laws about Brazilian ATM features. This way it is possible to imagine a simulation of a Flight Plan authorization being requested, processed and persisted as an ontology in a ".owl" extension, able to be processed, updated or opened by Protegé (Protegé, 2022). At the last line it is possible to observe the ontology being persisted with the same name to re-write the file.

- **cq3** - asks for the name of the that specific Flight Plan associated to a *Pilot in Command* filled by the user. Table 6 presents a simple query to find what is the instance of the class *Flight_Plan_BR* which is associated with Bruce_Dickinson?

It is possible to observe the python shell result presenting that specific instance of Flight_Plan_BR as the answer for the python query *search()*.

Table 6 - Python code for cq3 - VALIDATED

```
cq3 = filesystem.search(onto2.hasPilotInCommand_BR =
"*Bruce_Dickinson")
print(cq3)
#Shell result:
[TFM_BR.F_P_SITRAER]
```

- **cq4** - asks to re-open the persisted .owl file to show interoperability of the ontology created for the Flight Plan process (Table 5) with all possible future queries.

Table 7 presents python code to re-open the persisted file and a new kind of query, by *iri*, presenting a new way to search for entities.

Table 7 - Python code for cq4 - VALIDATED

```
re_open =
get_ontology("/home/rodriguez/Desktop/Only_Dev_OWL_TE
MP_Files/Teste_Ontologia_SITRAER_20_Ago.owl")
re_open.load()
print(re-open.search(iri = "*SITRAER"))
#Shell result:
[TFM_BR."F_P_SITRAER"]
```

At this point the authors checked that all ontologies generated by the experiments are compatible with any kind of update using owlready2 or Protegé.

- **cq5** - asks to list all the Flight Plan Form fields that were filled to compose the specific instance "F_P_SITRAER".

Python code in Table 8 presents one query for each filled field of the Flight Plan Form and the shell results with the short iri for each one of them:

Table 8 - Python code for cq5 - VALIDATED

```
print(re-open.search(iri = "*SITRAER"))
print(re-open.search(iri = "*Dickinson"))
print(re-open.search(iri = "*_MAIDEN"))
print(re-open.search(iri = "*_787"))
print(re-open.search(iri = "*SJC_SITRAER"))
print(re-open.search(iri = "*GL"))
print(re-open.search(iri = "*NT"))
print(re-open.search(iri = "*RF"))
#Shell result:
[TFM_BR.F_P_SITRAERTFM_BR.Bruce_DickinsonTFM_
BR.Boeing_787TFM_BR.Flight_MAIDENTFM_BR.RouteSJ
C_SITRAERTFM_BR.SBGLTFM_BR.SBNTTFM_BR.SBRF]
```

It is possible to observe the search for each entity by *iri*, which means python searches for the real name of the Individual and it is not a ***string***, it is a semantic description programmable and able to be queried like this. This way all CQ were answered by the new ontology and the functional requirements were validated, the ontology does what it was supposed to be done.

4. CONTRIBUTIONS, CONCLUSIONS AND FURTHER WORKS

Until this point the authors developed a set of semantic descriptions which brings some contributions for Air Transportation and for Software Developers Communities:

- A new extension of NASA's ontology, which imports the complete core of original files and creates a new one, the TFM_BR, which describes Brazilian TFM domain fitting new entities into those taxonomies;

- A new Brazilian TFM formal vocabulary with terms and relationships defined by the terms mapping between NASA's ones and those presented in the Flight Plans Forms. It can be used by air transportation systems as a dialect;

- A new TFM domain ontology in which all the Brazilian terms were fitted into NASA's taxonomy, according to each term's meaning and matching. It is a way to standardize the semantic vocabulary of all air transportation information systems;
- A new formal data exchange model which allows Brazilian ATM software to share information. It can maximize information exchange among airlines systems;
- The ability to use the Python language to develop software which uses ontologies as the core of information. It improves the quality of ATM and TFM developed systems.

These contributions are useful to all players of air transportation, considering airlines, crew members and air-traffic authorities. All information being filled on a Web form MUST be correctly interpreted by humans and software to reduce the risk of accidents caused by information misunderstoods. Air-traffic information must be interpreted by explicit semantic meaning because it allows developers to manipulate semantic objects, not *strings* or *enumerations*, like it is normally done using common programming languages. The authors have shown here python only interacts with the ontology by manipulating OWL Language stereotypes during the whole processing, or, semantic objects.

It is possible to conclude that the fidelity of the meaning of the processed data is very important at this new era of air transportation, which runs for getting more precision, sharing ability and a less cost to exchange data. World's aviation needs synchronization to avoid waste of time, of money and of people's lives and it is the reason for the running for semantic descriptions like the ontology developed in this work, which allows information systems to use them as the core of the domain description and get the semantic level of computing throughput.

References

OWL. Web Ontology Language. W3C recommendation.https://www.w3.org/OWL/. Access 06/1st/2022.

NASA. The NASA Air Traffic Management Ontology.Technical Documentation.Richard M. Keller.Ames Research Center, Moffett Field, California. June 2017.

W3C. World Wide Web Consortium. http://www.w3.org. Access 06/1st/2022.

Protegé. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems.https://protege.stanford.edu/. Access 06/1st/2022.

Potoniec J.; Wi D.; Ławrynowicz A.; Keet M. - Dataset of ontology competency questions to SPARQL-OWL queries translations. Data Article. Elsevier. Data in brief 29 (2020) 105098. Contents lists

available at ScienceDirect - Data in brief: journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib.

Gringinger, E. et al. A Comparative Study of Two Complex Ontologies in Air Traffic Management.Research, Frequentis AG, Vienna, Austria. Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center, Moffet Field, CA, USA. 2020.

AIRM. The ATM Information Reference Model (AIRM). The reference vocabulary for defining air traffic management information

https://airm.aero/. Access 08/23/2022.

Ron R. & Smith, B. et al. Best Practices of Ontology Development. White Paper. CUBRC, Inc., University at Buffalo, New York College of Technology and Institute for Military Support to Governance. October, 2016.

SWIM - MANUAL ON SYSTEM WIDE INFORMATION MANAGEMENT (SWIM) CONCEPT. International Civil Aviation Organization. 999 Robert Bourassa Boulevard, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7. Website https://www.icao.int/APAC/Pages/swim.aspx. Access 06/1st/2022.

ICAO - System Wide Information Management (SWIM), the International Civil Aviation Organization. www.icao.int. Access 06/1st/2022.

https://www.w3.org/Submission/OWL-S/. Access 06/01/2022.

UML2 - The Unified Modeling Language Specification Version 2.5.1.UML®. Unified Modeling Language: https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1/About-UML/. Access 06/01/2022.

DECEA. Departamento de Controle e Espaço Aéreo. HTTP://www.decea.gov.br. Access 06/01/2022

OWLREADY2. Python library owlready2-0.37. https://owlready2.readthedocs.io/en/v0.37/. Access 06/01/2022.

CHALLENGES TO THE OPERATIONAL SAFETY AND SECURITY OF eVTOL AIRCRAFT IN METROPOLITAN REGIONS: A LITERATURE REVIEW

Bruno Garcia Franciscone
Universidade Ferderal do Rio de Janeiro
bruno.franciscone@gmail.com
Elton Fernandes
Universidade Ferderal do Rio de Janeiro
elton@pet.coppe.ufrj.br

PAPER ID: SIT130

ABSTRACT

The concept of urban air mobility (UAM) emerged in the 1960s. Its implementation used helicopters to avoid congestion by land, typical of populated metropolitan regions. However, there was a severe limitation in using these aircraft because of accidents, huge operating costs, and high noise generation levels. In 2010, a new UAM concept conceived electric vertical take-off and landing (eVTOL) vehicles. These vehicles, in principle, would be safer, with lower operating costs and less noisy than helicopters. Several aircraft manufacturers have developed dozens of eVTOL models, focusing on the feasibility of using them for UAM in some metropolitan regions. However, we must consider several challenges to materialize this new concept, including those related to operational safety and security. Among these challenges is these vehicle operations integration to the airspace structure and the air traffic control system, the new embedded and ground systems development, the ground infrastructure implementation to support the operations, the reliability of air navigation systems, the meteorological information provision in real-time and with complete coverage of metropolitan airspaces to be used by eVTOL, and others. Despite some similarities, this new UAM concept will not be identical for all urban regions. Therefore, local studies are essential to support gradual and safe implementations of operations with these vehicles. This paper presents a literature review, identifying and discussing the utmost safety and security-related challenges researchers observe.

Keywords: UAM, eVTOL, Air Mobility, Metropolitan regions, Challenges.

1. INTRODUCTION

Metropolitan regions worldwide present an increase in demand for displacements in terrestrial transport modes each year, increasing congestion levels and economic impacts (FAA, 2020). In 2018, an estimate showed that Americans spent an average of 97 hours in traffic jams at an average cost of $1,348 per passenger (Wu & Zhang, 2021). In these scenarios, the demand for alternative means of transport increases, especially for those that use air modes within large urban centers (FAA, 2020).

The start of urban air mobility operations using helicopters began in the 1940s in Los Angeles to transport passengers and mail between various locations, including Los Angeles International Airport and Disneyland (Thipphavong et al., 2018). It is noteworthy, however, that the concept of urban air mobility (UAM) emerged only in the 1960s. The UAM concept implementation began to meet demands for displacements in and around metropolitan regions to avoid traffic congestion in terrestrial transport modes. Helicopters provide point-to-point displacement services at defined times (Wu & Zhang, 2021).

According to Wu & Zhang (2021), helicopter operations in urban areas over the years decreased. This decrease occurred because of the communities' low acceptance, some fatal accidents, and the noise level produced during operations. Several other factors also contributed, in a complementary way, to this reduction in the use of helicopters for UAM, such as the small number of helipads, limited air traffic control infrastructure, high operating costs with maintenance, fuel, and crew, logistical problems, and operational limitations in scenarios of unfavorable weather (Vascik et al., 2018).

In 2020, the Federal Aviation Administration (FAA), the body that regulates civil aviation in the United States, developed a new operational concept for the UAM, which envisages operations in urban and suburban environments, with a perspective of scalability of operations in the long term. This design uses electric vertical take-off and landing (eVTOL) vehicles. National Aeronautics and Space (NASA) announced the concept in 2010 (FAA, 2020). Advances in battery storage capacities and reduced densities due to lighter materials made eVTOL vehicles possible. In addition, other advances such as the development of multi-engine controls, the distributed propulsion advent, and the associated energy efficiency to enormous computing capabilities also help make it possible (NIA, 2018). Around 70 eVTOL vehicle manufacturers worldwide have invested billions of dollars in developing and competing to build the best model. However, to employ these vehicles in a new UAM concept, it is essential to understand the demands of stakeholders, the operational needs to incorporate them into airspaces, and the impacts they will have on air traffic control systems (FAA, 2020).

The FAA established some assumptions and guiding principles for creating a new UAM operating environment and defined three phases of implementation: initial operations, operations defined in Operational Design 1.0, and mature operations. These phases differ in terms of airspace structures, the technologies employed, and the level of automation of operations (FAA, 2020). However, according to Wu & Zhang (2020), several issues to be considered in implementing this UAM model can impact its viability and scalability. The vertiports' location, for example, is essential in allowing integration with other modes of transport and developing a route structure that meets the demands of users and makes the model economically viable. According to Rizzi et al. (2020), it is also essential to develop a strategy for engaging communities even before concerns related to the safety of eVTOL vehicle operations arise. Addressing these concerns with the populations around the sites to implement vertiports is necessary for accepting the new UAM model.

It is essential to clarify the difference between safety and security in aviation and their roles. Safety refers to the guarantee of an acceptable level of the risks associated with aviation activities or the support of aircraft operations (ICAO, 2016). On the other hand, security safeguards civil aviation against unlawful interference through practical measures and human and material resources

(ICAO, 2020). Another fact accepted in aviation is that achieving an absolute level of operational safety is impossible since a total avoidance of failures and errors is unachievable (Cokorilo, 2020). Any complex and large-scale systems will exhibit failures or unexpected behavior at some point because of unpredictable or not understood interactions between their components (Panesar et al., 2021).

Through a literature review, this article points out challenges related to the safety and security of in-flight operations of eVTOL vehicles in a new concept of UAM and ways to enable operations that meet acceptable levels of operational safety.

2. REVIEW APPROACH

The authors employed a systematic literature review to identify and analyze works related to the chosen topic. This review sought to follow the planning procedure of the systematic review proposed by Kitchenham (2007), which includes several steps: the need to carry out this review identification, the review specification, and the review protocol development. In addition, the planning process for writing this article also followed the recommendations of Kitchenham (2007). According to him, it is essential to identify and select the researched works related to the purpose of the proposed review. Finally, the review included only those works considered relevant after a detailed analysis of their content.

This review's relevance justification is the need to gather literature concerning challenges related to operational safety and security of eVTOL vehicle operations in flight. Considering and addressing these challenges will permit a new concept of UAM implementation with eVTOL vehicles, guaranteeing acceptable operational safety and security levels. The authors used articles, theses, dissertations, reports, and operational concepts from some databases as information sources. Regarding the review protocol, the authors used three databases: Science Direct, Web of Science, and Google Scholar. Keyword combinations used the following terms: "safety," "security," "urban air mobility," "UAM," "risk," "dangers," "challenges," "barriers," and "eVTOL." The search included research materials from the last six years.

The selection process considered within the study scope for further analysis and inclusion in the article identified documents with several challenges related to the safety and security of eVTOL vehicle operations and actions to ensure acceptable levels of safety and security. Among them are challenges related to certification, regulation, and standardization of operations with this type of vehicle, crash prevention and mitigation, integration of operations with the air traffic control system, cyber security, monitoring of the navigation systems performance, and weather conditions in urban environments, and contingency management through operations centers.

3. THE eVTOL VEHICLES OPERATIONAL SAFETY AND SECURITY CHALLENGES IN URBAN AND SUBURBAN REGIONS

According to Mueller et al. (2017), it is possible to classify the many eVTOL vehicles under development into two categories: "large multicopters" and "powered lift aircraft." In the first category, lift in all phases of flight is generated by propellers or rotors. In the second one, convertible rotors or wings ensure lift during the take-off process and transition to lift obtained by wings during cruise flight. Regardless of the category, these vehicles will operate in a network of vertiports. Under ideal conditions, the flight between a vertiport of origin and a destination will consist of two segments on the ground (take-off and landing) and an air segment (cruise).

The eVTOL vehicles will likely operate similarly to regular aviation on demand. Among the leading causes of accidents recorded for the aircraft that operate according to this model are loss of control in flight, failures in the functioning of the power supply systems, unintentional flight in instrument meteorological conditions, operations at very low altitudes, and finally, collisions. After the release of these vehicles, continued testing by

manufacturers to demonstrate high levels of safety will contribute to their acceptance by the public and potential users (Littell, 2019).

According to Bauranov & Raskas (2019), from a qualitative and quantitative risk analysis carried out by the precepts of the Operational Safety Management System, it was shown that risks associated with control errors of eVTOL vehicles, sabotage, and collision with birds tend to grow. The conclusions pointed out that manned eVTOL flights will be less safe than those performed by aircraft operating in commercial aviation and will not comply, at first, with the ICAO guides related to air collisions.

Usually, users do not accept a new mode of transport until their safety perception meets a high standard. This demand emerges because, according to Maslow's pyramid, which ranks needs that direct human behavior, the physiological and safety requirements must first be satisfied so that human beings pursue others of a higher hierarchy. Issues related to convenience and comfort are secondary to safety (Edwards, 2020).

According to technology experts, the factors that can potentially influence users' perception of safety concerning eVTOL vehicles are pilot proficiency, resilience to operate in bad weather, collision detection, and avoidance systems. Other relevant potential factors are automatic emergency landing systems, protection against hacked autonomous flights or disabled pilots, and the ability to handle medical emergencies (Edwards, 2020). Additionally, it is noteworthy that the operational concepts, technologies, and procedures to support operations must meet at least minimum criteria to provide an acceptable level of operational safety (Mueller et al., 2017).

Ensuring the safety of occupants of eVTOL vehicles can be achieved through collision avoidance and mitigating the effects of a collision. While the first is related to the development of accident prevention systems, the second is associated with developing systems that protect users when a crash occurs. Collision avoidance systems use systems already used by autonomous motor vehicles (Littell, 2019).

According to Littell (2019), hybrid material systems can mitigate the effects of a collision, combining materials composed of low-density carbon and Kevlar shaped in a tubular form capable of absorbing more energy than tubes developed only by carbon compounds. Additionally, proper development of seating and containment systems can further mitigate impacts. Many eVTOL vehicle manufacturers consider using parachutes or Ballistic Recovery Systems (BRS). These devices, however, have been developed for use in small fixed-wing aircraft and must be adapted to these vehicles' operational and structural characteristics.



Figure 1 Tube developed only by carbon compounds (left) and tube developed with kevlar and carbon compounds mixed (right) post-test deformation.
Source: (Littell, 2019).

Integrating eVTOL vehicle operations into the currently implemented air traffic management system will take place in the context of low-density operations. In this context, they will fly routes now available for helicopter traffic under visual flight rules (VFR) with pilots onboard (Edwards, Verma & Keeler, 2019). Under these rules, the aircraft pilots are responsible for separating from other aircraft and with the terrain, sequencing with the other aircraft, and planning the trajectories they will follow. Furthermore, eVTOL vehicles would not need new embedded technologies to fly under VFR in these airspaces. However, this is not a long-term solution due to limitations in scalability related to operational safety factors, such as the increasing difficulties of separation with other aircraft, with the ground, with obstacles, and with areas where there is degradation of weather conditions. (Muller et al., 2017). In addition, there is a maximum number of aircraft an air traffic controller can safely manage in controlled airspace (Edwards et al., 2019).

According to Edwars et al. (2019), an integration study in the initial phase of operations showed that a rise in the density of aircraft increases the workload of air traffic controllers, which creates a risk of loss of situational awareness for these professionals and a greater possibility of air traffic incidents. Even so, mitigation is possible by establishing operational agreement letters and optimized routes supported by technologies that reduce the need for communication between pilots and air traffic controllers and avoid entry into controlled airspaces (Edwards et al., 2019).

However, mitigation through operational letters of agreement and optimized routes is only feasible for the initial implementation phase. It is essential to develop new technologies and procedures that will facilitate the transition of the model from the initial phase to the successive stages safely to allow the scalability of operations (Thipphavong et al., 2018).

Technology advancements have historically reduced accident rates on all generations of existing aircraft. Because of the high-reliability level in aviation systems, human factors remained the main area to improve the safety levels of operations (Cokorilo, 2020). In the past, pilot involvement was considered a redundant system in supporting technology. However, the crews are now potential sources of error (Connors, 2020).

One possible method to verify the safety of new components and systems of eVTOL aircraft is to compare them to similar pre-existing systems that have complied with stipulated safety standards (Connors, 2020). In addition, it is necessary to perform fast-time simulations, flight demonstrations, and evaluations of human interactions with the systems under development to ensure that it is feasible and that the safety of air operations will not be compromised (Thipphavong et al., 2018). The flight demonstrations must allow progress in implementations at a slow pace, with tests considering the best possible safety conditions. For example, flights on simple trajectories over uninhabited areas should be considered (Connors, 2020).

According to Vascik et al. (2018), the allocation of some vertiports in several airports is due to the demand for displacement between them and other vertiports located in different parts of the city. For this to be viable, there is a need for secure integration of eVTOL vehicle operations with airport operations.

There are restrictions on the safe integration of eVTOL aircraft operations in flight under VFR and airport operations due to the separations required because of the wake turbulence produced by conventional aircraft and the increased workload of air traffic controllers, especially at airports with large volumes of operations. The reduction of these restrictions is possible by considering divergent departure procedures, which safely reduce the separation required due to wake turbulence. In addition, implementing more spaced arrival procedures allows simultaneous operations without joining distinct flows, with segments of air taxis at low altitudes to the vertiports. Therefore, there will be a reduction in the frequency of interaction with air traffic controllers, substantially reducing the risk of loss of situational awareness and the likelihood of air traffic incidents (Vascik & Hansman, 2021).

There are more significant difficulties in integrating aircraft operating under instrument flight rules (IFR) because of the requirement for larger separations between aircraft during the final approach. The mitigation of the separation issue is possible by using approaches to converging runways in the airports where they are viable (Vascik & Hansman, 2021).

To integrate eVTOL vehicle operations into airspaces, under IFR, with minor and more flexible separations than those used for conventional aviation, it is essential to develop technologies centered on the vehicle itself. Among these technologies, the ones that present to pilots the traffic flying in the aircraft's surroundings, separation algorithms, and radio command and control communication links stand out. This integration is essential to allow aircraft operating under VFR that lose the ability to see and avoid other aircraft due to adverse weather conditions to continue their flights under IFR safely. In addition, it will be possible to avoid other safety issues, such as collisions with

ground obstacles due to low visibility conditions (Muller & Kopadekar, 2017).

According to Bauranov & Rakas (2021), in more mature phases of operation of eVTOL vehicles in the new UAM model, with a more automated air traffic control system and with higher traffic densities, it is considered to reduce the separation between aircraft, safely, according to the level of development of the system. In this way, it will be possible to increase the capacity of airspaces. In addition, according to Panesar et al. (2021), it will be necessary for operators of cellular telephony services to act collaboratively to ensure secure and continuous datalink communications at peak times so that they are available during the occurrence of some disruption emergency.

It is also necessary to develop exclusive airspace structures for eVTOL vehicles, such as exclusive corridors. These corridors will allow operations at low altitudes, with high traffic densities and reduced separations between them, sufficient to avoid dangers caused by wake turbulence. Systems that arrange the eVTOL vehicles in sequences and manage their flow, considering that they will be of different models and with varying envelopes of speed, will assure the safety of the operations in these corridors (Muller et al., 2017).

Safe separations between eVTOL vehicles may be flexible, depending on their structure and capabilities. It will be possible to ensure safe and non-standard separations in some airspaces, carried out, when necessary, by the aircraft, according to the principle of sense and avoid. Radars, lidars, or cameras installed in these vehicles, their energy capacity, and complex algorithms will resolve imminent conflicts between them (Bauranov & Raskas, 2021). All these embarked technologies will permit eVTOL vehicles to fly in an instrument weather environment as if flying under VFR (Muller, 2017).

Despite using of the sense and avoid principle, allowing more minor separations, and avoiding collisions between aircraft autonomously, its use in dense airspaces can generate a chaotic scenario impacting the flow and, consequently, the efficiency of operations. In addition, to sense and avoid technology, there is a need to implement strategic traffic conflict resolution tools based on the analysis of desired trajectories and other navigation support technologies. Some of these tools are maps that point to regions of restricted access and generate scenarios of meteorological conditions data of the airspaces of interest, tactical path allocators, and dynamic restricted areas whose entry is not recommended or negotiated (Bauranov & Raskas, 2021).

According to Maxa et al. (2019), the systems on board eVTOL vehicles to transport passengers, especially in the more mature phases of operation, will be complex and connect them to systems on the ground. These systems will expose many sensitive interfaces to cyber-attacks and the need to create security mechanisms to protect critical navigation data, sensors, and command-in-control components. Developing recovery mechanisms to land a vehicle with compromised systems safely is also vital.

Therefore, it is crucial to develop operations centers that concentrate on various elements essential to the operations. These centers will be responsible for planning and monitoring the flights of eVTOL vehicles. Aircraft need to be able to detect abnormal behavior and trigger a recovery mode automatically. This recovery mode should be able to select alternative routes and locations for emergency landings. It is also necessary to control aircraft from the ground, detect intrusions to communication systems and networks and send alerts to ground stations (Maxa et al., 2019).

It is essential to ensure redundancy for the electrical systems and the rotors so that the eVTOL vehicle continues to fly in the event of electrical failures or if one of the rotors stops working. The so-called Distributed Electric Propulsion (DEP) is capable of generating redundancy in rotors and batteries and is the ideal system to ensure operational safety when individual components fail (LITTELL, 2019).

Furthermore, to contingencies that may affect individual aircraft, such as loss of an electric motor, loss of communications system, onboard medical emergency, or loss of aircraft separation assurance system, some contingencies may affect the entire fleet of eVTOL vehicles simultaneously. Some

examples are the interdiction of some vertiport, degradation of the GNSS signal, adverse meteorological conditions, and conventional aircraft in an emergency descent crossing eVTOL corridors (Muller et al., 2017). Dealing with the many possible emergencies will require interconnected infrastructure, with an intense level of coordination between different stakeholders. In this way, making decisions in real-time will be possible. (Panesar et al., 2021).

Strategies must guide the implementation of intrusion detection systems for this UAM new model with eVTOL vehicles. These strategies must define their locations to be accurate and detect as many threats as possible. The best model of intrusion detection systems for this context is specification-based. In this model, the behaviors of a system are described based on its functionalities and security policies. The detection of a security breach occurs if any operation is outside these specifications. Recording all behaviors deemed appropriate in an intrusion detection system generates no false alarms when unusual but appropriate behavior occurs. With this, there is the possibility of detecting unknown attacks in advance (Maxa et al., 2019).

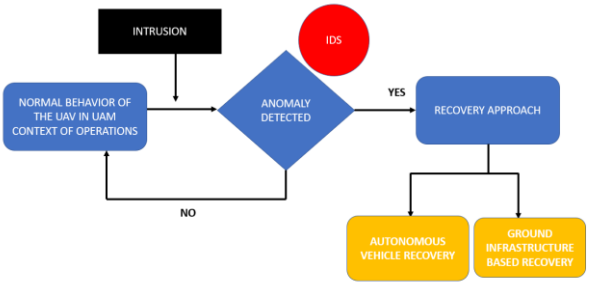


Figure 2 Recovery-based approach overview
Source: (Adapted from Maxa et al., 2019).

According to Bijjahalli et al. (2019), another essential requirement to enable safe operations of eVTOL vehicles is the guarantee of a high-performance navigation system, which is associated with performance predictor systems. This performance predictor system is necessary since the Global Navigation Satellite System (GNSS) in dense urban environments, called urban canyons, remains impaired due to problems such as multipath signal and dilution of precision. The cause of these problems is the unfavorable geometry of satellites that depend on a clear line of sight between receiving antennas and orbiting satellites.

Moreover, to reduce pilots' workload in more mature operational environments with higher traffic densities and ensure an acceptable level of safety for operations, it is required to introduce a level of automation that monitors the conformation of trajectories, the protection envelopes, and the performance of aircraft sensors. However, according to Panesar et al. (2021), additional navigation support infrastructure should be developed so that it is not needed to use only GNSS. This navigation support infrastructure will create a security buffer to deal with high-pressure scenarios with high traffic demand.

According to Reiche et al. (2021), weather conditions impact the willingness to fly of potential users of eVTOL aircraft, even though more than 50% of them accept to fly even in adverse conditions. The biggest concern, however, relates to flying in conditions of rain, snow, low visibility, and turbulence. However, these potential users are not apprehensive about flying in extreme cold or heat conditions. Maybe this lack of apprehension is because they do not understand the dangers of these conditions, such as the possibility of freezing of aerodynamic surfaces, excessive air rarefaction, and loss of aircraft power.

The impacts arising from meteorological conditions are different in different regions, so it is necessary to develop aircraft with varying characteristics for use in each region. Additionally, meteorological information measurement and dissemination systems must be improved to support eVTOL vehicle operations. The currently existing systems do not provide real-time information and do not have full airspace coverage. It will be necessary to implement sensors for meteorological purposes coupled with 5G networks and use artificial intelligence to improve weather forecasts. (Reiche et al., 2021).

The weather conditions generated by the friction of moving air with buildings which cause sudden changes in wind direction and speed, bring the necessity for real-time monitoring with full coverage in metropolitan regions. Depending on the degree of these

variations, the vehicle may have excessive energy expenditure to maintain a stabilized flight (Bauranov & Raskas, 2021). This energy expenditure could impair the vehicle's autonomy once the charge is only sufficient for the intended flight and, in an emergency, to access alternative vertiports and in-flight waits (Connors,2020).

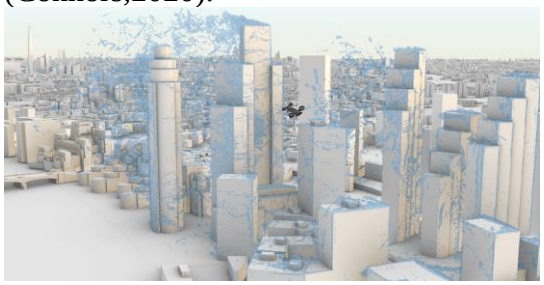


Figure 3 A snapshot in time of a cloud-based (DES) where the turbulent wind formations generated by the buildings, part of the urban canopy, are visible
Source: WSP

It is noteworthy that even advanced control algorithms may not guarantee the level of navigation precision to avoid obstacles on the ground and the excessive approach of other aircraft. According to studies undertaken by NASA, winds more significant than 5 m/s can make it impossible for smaller unmanned aircraft to fly (Bauranov & Raskas, 2021).

4. DISCUSSION

This article identified several aspects of the operational safety and security of eVTOL vehicles operating in urban and suburban environments in a new UAM concept. Some of these aspects are the way to integrate them into the existing airspace structure at present implemented air traffic control system. Suppose vehicles use the corridors customized for helicopter operation to travel between vertiports implemented in urban and suburban regions, as suggested. In that case, there is an accommodation limit to the safe number of aircraft in these corridors, especially in controlled airspaces, because of the limitations of existing air traffic control systems, which require voice communication between pilots and air traffic controllers.

In metropolitan regions, where helicopter traffic is already heavy and the air traffic control system is saturated, the insertion of eVTOL vehicles, even in the initial phase, will lead to operations restrictions. Even inserting a few additional traffic in these airspaces can increase the probability of air traffic incidents because of their capacity depletion and the situational awareness of pilots and air traffic controllers' losses. Implementing routes that avoid controlled airspace regions, establishing operational agreement letters that reduce oral communications between pilots and air traffic controllers, and defining standardized procedures that decrease interactions can mitigate the risk of incidents caused by heavy traffic. Using technologies to exchange automatic information between air traffic control facilities and pilots with no oral communication is essential. However, this type of solution is not always viable. It will depend on the site's topography, the region's meteorological conditions, the complexity of local air traffic flow scenarios, and the possibility of implementing technological solutions.

Considering that the operations of eVTOL aircraft can scale in metropolitan regions, it is necessary to develop technologies that allow these aircraft autonomously to detect and separate themselves to maintain adequate operational safety levels. This increase in automation levels will reduce the workload of pilots and air traffic controllers. In addition, implementing cybersecurity, operations management, and ground control systems must prevent the eVTOL vehicles from being "hacked" and placed at risk or, even if an attack occurs, from having their control re-established by ground operations centers.

It is important to highlight that operations management and ground control centers will be essential for adequate emergency management and the coordination of air traffic conflicts between eVTOL vehicles and other conventional aircraft, particularly in the airports' vicinity with high traffic demand. Furthermore, these centers would allow the strategic trajectories negotiation between the different eVTOL vehicles and the other unmanned and conventional aircraft to prevent crossing trajectories at conflicting altitudes and positions.

Finally, it is necessary to monitor the performance conditions of navigation systems

and weather conditions in different regions where there is a demand to implement this new concept of UAM. This monitoring is necessary due to the large density of buildings forming the so-called urban canyons in which eVTOL aircraft will operate, which makes it difficult for the GNSS navigation systems to function correctly. Additionally, gust winds without a defined pattern can affect flight safety. The greater or lesser degree of these interferences will depend on the characteristics of the urban and suburban regions.

5. CONCLUSION

Addressing safety and security issues are crucial for implementing a new UAM concept using eVTOL vehicles. From the initial phases of implementation to the more mature phases of operation, it is essential to identify operational safety risks related to technical, functional, and human factors. The scalability of operations must have a gradual implementation, with the support of simulations, ensuring acceptable levels of operational safety at each stage.

As a last remark, it is necessary to understand that, in using certain regions' implementations as a reference for others, challenges related to operational safety and security may be different. These differences are, for example, related to topographies, weather, urban construction patterns, and other air traffic control systems. So, each region needs specific studies to identify aspects that may impact the safety of operations more accurately.

References

Bauranov, A., & Rakas, J. (2021). Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts and approaches. Progress in Aerospace Sciences, 125, 100726.

Bijjahalli, S., Sabatini, R., & Gardi, A. (2019). GNSS performance modeling and augmentation for urban air mobility. Sensors, 19(19), 4209.

ICAO (2020) International Civil Aviation Organization. Annex 17 to the Convention on International Civil Aviation: Security. Safeguarding International Civil Aviation Against Acts of Unlawful Interference, 2020. Retrieved Jul 23, 2022, from https://portal.icao.int/icao-net/Annexes/an17_cons.pdf.

ICAO (2016) International Civil Aviation Organization. Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation: Safety Management, 2016. Retrieved Jul 24, 2022, from https://portal.icao.int/icaonet/Annexes/an19_cons.pdf.

Cokorilo, O. (2020). Urban air mobility: safety challenges. Transportation research procedia, 45, 21-29.

Connors, M. M. (2020). Understanding Risk in Urban Air Mobility: Moving Towards Safe Operating Standards.

Edwards, T., & Price, G. (2020). eVTOL passenger acceptance (No. ARC-E-DAA-TN76992).

FAA (2020) Federal Aviation Administration Urban Air Mobility (UAM), Concept of Operations. V1.0, US Department of Transportation. Office of NextGen, 2020. Retrieved Jul 19, 2022, from https://www.faa.gov

Littell, J. D. (2019, August). Challenges in vehicle safety and occupant protection for autonomous electric vertical take-off and landing (eVTOL) vehicles. In 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS) (pp. 1-16). IEEE.

NIA 2018 Powered for Take Off: Eletrical Infrastructure Study for UAM Aircraft. National Aeronautics and Space Administration, 2018. Retrieved Jul 19, 2022, from https://www.nasa.gov

Maxa, J. A., Blaize, R., & Longuy, S. (2019, September). Security challenges of vehicle recovery for urban air mobility contexts. In 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC) (pp. 1-9). IEEE.

Mueller, E. R. (2017). Enabling airspace integration for high density urban air mobility

Panesar, K., Mathur, A., Atkins, E., & Sarter, N. (2021, September). Moving From Piloted to Autonomous Operations: Investigating Human Factors Challenges in Urban Air Mobility. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 65, No. 1, pp. 241-245). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Reiche, C., Cohen, A. P., & Fernando, C. (2021). An initial assessment of the potential weather barriers of urban air mobility. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22(9), 6018-6027.

Rizzi, S. A., Huff, D. L., Boyd, D. D., Bent, P., Henderson, B. S., Pascioni, K. A., ... & Snider, R. (2020). Urban air mobility noise: Current practice, gaps, and recommendations (No. NASA/TP-20205007433).

Rothfeld, R., Fu, M., Balać, M., & Antoniou, C. (2021). Potential urban air mobility travel time savings: An exploratory analysis of munich, paris, and san francisco. Sustainability, 13(4), 2217.

Vascik, P. D., & John Hansman, R. (2021). Evaluating the Interoperability of Urban Air Mobility Systems and Airports. Transportation Research Record, 2675(6), 1-14.

Vascik, P. D., Hansman, R. J., & Dunn, N. S. (2018). Analysis of urban air mobility operational constraints. Journal of Air Transportation, 26(4), 133-146.

Thipphavong, D. P., Apaza, R., Barmore, B., Battiste, V., Burian, B., Dao, Q., ... & Verma, S. A. (2018). Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations. In 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. DOI: https://doi. org/10.2514/6.2018-3676.

WSP (2022). Urban Air Mobility: A Wind Engineering Perspective. Retrieved Jul 24, 2022 from https:// www.wsp.com.

Wu, Z., & Zhang, Y. (2021). Integrated Network Design and Demand Forecast for On-Demand Urban Air Mobility. Engineering, 7(4), 473-487.

ACESSO AO TERMINAL AEROPORTUÁRIO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS: UMA ANÁLISE CONSIDERANDO INTERMODALIDADE FERROVIÁRIA

Wellington Luiz Rocha da Silva Filho, Marcelo Xavier Guterres, Giovanna Miceli Ronzani Borille, Viviane Adriano Falcão
Aeronautics Institute of Technology (ITA)

*** Corresponding author e-mail address**: wellington.filho@ga.ita.br

PAPER ID: SIT151

ABSTRACT

The growth of air transport has been providing structural changes in the sector. Thus, the main airports in Brazil, which were previously administered by INFRAERO, a federal public company, began to be granted as of 2011 to the private sector, with the prerogative of improving infrastructure and increasing processing capacity. The growth in passenger demand and factors such as accessibility, quality of service and frequency of flights promote competition between airports, and these criteria are relevant in airport analysis. Thus, this paper aims to initially evaluate the most relevant factors in the choice of a passenger terminal through a linear regression. In a second analysis, through three scenarios, which consider the type of trip to be made, to verify which are the most relevant factors in the choice of the railway modal as ground access to the airport, considering a supposed railway connection between the south of São Paulo and the São Paulo/Guarulhos International Airport (SBGR). The information for each scenario was collected in an internet search and the multinominal logit was applied in order to verify which variables among the observed criteria are more relevant for the choice of this ground access to the airport. In both leisure and business travel scenarios, the income variable was significant for the choice of rail transport if the other forms of access were more expensive. For family travel, income was significant in terms of access time and land access price.

Keywords: Airport Access, Airport Choice, Logit Multinomial, Intermodality..

1. INTRODUÇÃO

O setor aéreo passou por mudanças estruturais que impulsionaram um crescimento acelerado na movimentação de passageiros. O ponto de partida para esse crescimento foi a competição no mercado de linhas aéreas. As rodadas de liberalização, iniciadas em 2011 no país impulsionaram a redução das barreiras e possibilitaram à entrada de novas companhias aéreas resultando em uma liberdade tarifária. Em conjunto com o aquecimento da atividade econômica, o número de passageiros passou a crescer a taxas aceleradas. A confirmação desse crescimento é evidenciada uma vez que segundo Mckinsey e Company (2010) entre 1997 e 2002 o tráfego creceu 4% a.a., enquanto de 2003 até os dias atuais esse crescimento passou a ser de 10% a.a. Assim, o movimento de passageiros, que em 2003 era de 71,2 Milhões de Passageiros Anuais (MPA), atingiu o patamar de 196,6 MPA em 2013.

Mesmo com o crescimento nos últimos anos, o mercado aéreo ainda apresenta grande potencial de expansão, principalmente no cenário brasileiro, onde nota-se que esse está em estágio inicial de desenvolvimento. Países mais desenvolvidos apresentam uma média de 3,7 passageiros por habitante, enquanto no Brasil essa razão é de 1,03, conforme apresentado na Figure 1. Dessa forma, é provável que essa razão continue a crescer nos próximos anos, impulsionados pelo crescimento econômico do país, introdução de novas linhas aéreas e a liberdade tarifária.

Com o crescimento fluxo de passageiros, a infraestrutura que antes atendia uma determinada movimentação, não supre as necessidades causadas pelo crescimento de demanda, e ocasiona gargalos nos atendimentos dos aeroportos, exigindo investimento em infraestrutura, de forma a reduzir limitações nas operações. Essa infraestrutura é essencial, visto que grande parte dos vinte maiores aeroportos operavam com elevados níveis de atraso nas horas pico, além dos gargalos nos processadores, impulsionados pelo crescimento de demanda e pelas restrições operacionais nos pátios de aeronaves (Mckinsey e Company, 2010). Isso forçou a entrada na segunda fase de transformações, que envolveu um rearranjo institucional e a concessão à iniciativa privada de importantes aeroportos da Infraero, com o objetivo de aumentar a capacidade e a qualidade do serviço da infraestrutura aeroportuária.

O surgimento de novas companhias aéreas, avanço na acessibilidade e aumento da globalização e das concessões são fatores que impulsionam a concorrência entre aeroportos (Murça; Correia, 2013). Adicionalmente, a sobreposição das áreas de captação de voos também se torna um fator importante na concorrência (Lieshout (2012); Cheung *et al*.(2020)). Por sua vez, Jimenez *et al*. (2014), afirmam que a globalização surgiu com a expansão da desregulação econômica, a qual promove competição entre aeroportos por vários serviços, especialmente no setor de gerenciamento e consultoria. Além disso, outro fator importante na análise de concorrência aeroportuária foi a possibilidade de operadoras privadas receberem a administração de aeroportos, assim como a aquisição inteiramente ou parte deles (Jimenez *et al*., 2014).

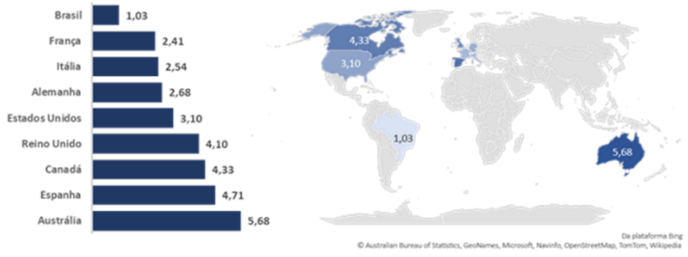


Figure 1 Proporção de passageiros por habitantes. Fonte: Elaboração própria, com dados adaptados de Eurostat, 2019; United States Departmnt of Transportation, 2020; Statistics Canada, 2022; LabTrans, 2022.

O presente estudo possui como objetivo avaliar quais são os fatores mais relevantes para a escolha de um terminal aeroportuário e verificar em uma segunda análise o impacto de uma suposta ligação ferroviária entre a Estação Jabaquara, localizada no sul da cidade de São Paulo com o Aeroporto Internacional de São

Paulo/Guarulhos (SBGR) de forma a entender quais são os principais fatores dentre cada um dos cenários considerados que são relevantes para escolha desse modal como acesso terrestre ao terminal aeroportuário e analisar as possíveis consequências que essa proposta ligação intermodal traria na demanda do Aeroporto de São Paulo/Congonhas (SBSP) e SBGR. Para isso, utilizou-se regressão linear pelo método dos mínimos quadros ordinários (MQO) para definir os fatores mais relevantes na escolha do aeroporto, e em seguida aplicar o modelo *logit multinominal* com base nas respostas de um questionário realizado na internet para avaliar as variáveis mais relevantes no modelo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Subdividida em dois tópicos: (i) o primeiro relata fatores relevantes na escolha aeroportuária, e o segundo (ii) tópico a concorrência aeroportuária.

2.1. Escolha Aeroportuária

Os principais aeroportos públicos brasileiros eram operados pela INFRAERO, o que impossibilitava um grande crescimento na concorrência. Com o programa federal de concessões aeroportuária, que em 2022 completa 12 anos, houve um fortalecimento da política de concessões de transportes, o que possibilitou que 44 ativos fossem concessionados até 2021, totalizando 77% da movimentação de passageiros no Brasil (Nykiel, 2021). O programa federal de concessão possibilita que os aeroportos passem a ser administrados por empresas privadas, se tornando uma medida recorrente, o que impulsiona a concorrência.

Segundo Yosimoto *et al*. (2016) o crescimento da demanda e o baixo investimento em infraestrutura feito pelos órgãos públicos geraram gargalos no setor aeroportuário brasileiro, limitando o crescimento da movimentação de passageiros. A infraestrutura detém um papel fundamental para o nível de serviço do aeroporto, e com a competitividade do terminal. Dessa forma, a infraestrutura deve refletir na estratégia de *marketing* do terminal (Tretheway; Kincaid, 2005).

Visando a melhora na infraestrutura o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos que é o responsável pela maior movimentação de passageiros e número de pousos e decolagens, foi concedido em 2012 e está sob administração da empresa privada GRU *Airport*. Por sua vez, o Aeroporto de São Paulo/Congonhas, é o segundo maior em número de pousos e decolagens, e está sob administração da INFRAERO (ANAC, 2020). Entretanto, SBSP está em processo de licitação para concessão, com o objetivo é impulsionar os investimentos, modernização no setor e crescimento da aviação (Yosimoto *et al*., 2016).

Estudos realizados por Murça e Correia (2013) e Paliska *et al.* (2016) definem que a escolha aeroportuária pelos passageiros está associada principalmente ao tempo de acesso ao aeroporto, a tarifa da passagem e a frequência de voos. Adicionalmente, outros fatores como horário, escolha da companhia aérea e modal de acesso são primordiais na definição do sítio aeroportuário (Murça e Correia, 2013).

Os usuários de grandes aeroportos podem fazer o acesso ao sítio seja por carro próprio, alugado, aplicativo, *táxi*, ou transporte público. Entretanto, a escolha do meio de transporte a ser utilizado depende de diversos critérios de análise. Para Tsamboulas *et al*. (2008) passageiros business, estão mais dispostos a pagar mais caro para acessar o aeroporto, caso haja uma redução no tempo de trajeto. No tocante aos passageiros em geral, variáveis como renda, quantidade de bagagens, nacionalidade do passageiro e tempo de acesso são fatores decisivos na escolha da alternativa da ligação terrestre (Alhussein, 2011).

2.2. Concorrência Aeroportuária

Existem diversos fatores que justificam o surgimento da concorrência entre aeroportos, a escolha do aeroporto como *hub* pelas companhias aéreas e sobreposição da área de captação dos voos são alguns desses. Pode-se dizer que a área de captação é dinâmica e a escolha pelos passageiros por um determinado aeroporto depende de variáveis como, tempo

de viagem para chegada ao terminal, grau de satisfação, tarifas e frequências de voos em comparação com os aeroportos próximos (Lieshout, 2012; Cheung *et al*., 2020).

A competição aeroportuária surge conforme a demanda de voos cresce e a viabilidade de novas rotas são distribuídas de forma a suprir percursos que atendam a demanda com agilidade e menor número de conexão entre aeroportos possíveis (Domingos *et al*., 2020). Adicionalmente, a acessibilidade e os serviços oferecidos pelos aeroportos são fatores essenciais para a competição. Consequentemente, a concorrência envolve a melhoria dos serviços oferecidos pelas operadoras dos aeroportos, uma vez que por estarem concorrendo entre si, o avanço das infraestruturas e qualidade do atendimento são fatores influenciadores na escolha pelos passageiros. O intuito é introduzir novos serviços e manter as operações com qualidade e baixo custo, para assim, permitir a concorrência entre aeroportos e outros meios de transportes.

Apesar dos aeroportos analisados já apresentarem as maiores movimentações entre os terminais brasileiros, esses ainda contam com a possibilidade de crescimento de capacidade, se forem feitas as melhorias necessárias em infraestrutura para atender o crescimento de movimentação. A grande movimentação nos aeroportos em análise está associada ao fato desses estarem no entorno da maior cidade do país, e maior polo comercial do Brasil. O Aeroporto de Congonhas e o Aeroporto de Guarulhos estão localizados a uma distância de 35km. Aeroportos também competem com outros meios de transportes, como carros privados, ônibus rodoviários e trens, o que pode impactar na demanda de aeroportos (Jimenez *et al*., 2014).

Para o transporte aéreo a integração com outros meios de transportes é um fator totalmente relevante, pois esse favorece a acessibilidade, e quanto maior for a disponibilidade de modais para acessar o aeroporto, maior será a soberania na escolha do terminal (Domingos, Falcão e da Silva;2020).

Segundo Domingos *et al*. (2020), facilidade no uso do modal que permite acesso ao aeroporto é relevante na escolha por um terminal entre os passageiros, e por essa razão, avaliar o impacto da ligação ferroviária entre o sul da maior metrópole do Brasil ao aeroporto de Guarulhos, que já apresenta a maior movimentação do país é de extrema sensibilidade para avaliar, pois através dessa análise é possível projetar melhorias em infraestrutura de forma a aumentar o nível de satisfação dos passageiros, bem como as possibilidades de expansão de novas rotas. A possível mudança na escolha aeroportuária, impulsionada pela nova ligação terrestre está também interligada a futuras melhorias e reorganização no setor aéreo, e os operadores são responsáveis em conduzir as operações de planejamento, fiscalização e operação com êxito.

3. MODELO E RESULTADOS

O presente capítulo é composto por 3 tópicos: (i) o primeiro imprime as informações do questionário, (ii) o segundo tópico aborda a modelagem aplicada no trabalho, e (iii) o terceiro relata os resultados da pesquisa.

3.1. Questionário

Para coleta de dados e aplicação dos modelos utilizados no presente trabalho, foi realizado um questionário digital entre os dias 10 de junho e 25 de junho de 2022, de forma a entender incialmente quais são os fatores mais relevantes na escolha do terminal de passageiros. Em seguida, três cenários foram considerados dentro do questionário, o primeiro trazendo como hipótese o passageiro viajando sozinho a lazer, o segundo considerando o passageiro viajando a trabalho e o terceiro considerando um passageiro viajando em família, de forma a entender por base das respostas coletadas, quais são os fatores mais significantes na escolha do modal ferroviário caso existisse uma ligação direta entre o sul da cidade de São Paulo e o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos.

3.2. Modelagem

Inicialmente foi verificado no estudo quais são as variáveis mais relevantes na definição da escolha de um terminal

aeroportuário por meio de um teste de hipótese aplicando regressão pelo método dos mínimos quadrado (MQO) com o *software Gretl* (2019), considerando as variáveis dependentes e independentes fornecidas no questionário de forma linear. Para verificação da significância das variáveis, foi feita a análise dentre as variáveis propostas de quais apresentaram maior valor de razão-t e menores valores de p-valor. Em complemento, foi observada a aderência do modelo com as variáveis estudadas, através da R-quadrado, de modo que o modelo se torna mais ajustado quanto mais próximo o valor do R-quadrado for de 1.

Para a modelagem inicial, as variáveis independentes utilizadas foram distância terrestre, número de companhias áreas, quantidade de voos ofertado e tempo de acesso ao aeroporto, enquanto as variáveis dependentes para cada um dos dois cenários de análise foram respectivamente idade e renda. O modelo gerado para verificação da significância das variáveis pode ser observado na equação 1:

$$Variável\ Dependente = a + b * Distância\ Terrestre + c * Tempo\ de\ Acesso + d * Quantidade\ de\ Voos + e * Tarifa\ Aeroportuária + u \quad (1)$$

Onde a variável dependente é a idade para o cenário 1 e renda para o cenário 2, "a" é a constante, "b", "c", "d" e "e" são os coeficientes parciais de regressão; e "u" é o termo do erro estocástico.

Em uma segunda análise, foi aplicado o modelo *logit multinomial*, visando entender dentre as respostas obtidas no questionário quais eram mais significativas para escolha do transporte ferroviário como modo de acesso ao Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. Isso pois Paliska *et al*. (2016) relatam que a região de captação dos aeroportos pode sofrer alterações com o passar do tempo. E conforme mencionado anteriormente, o acesso terrestre é um fator relevante na escolha de aeroportos.

A maioria dos modelos teóricos sobre a escolha da forma de acesso ao aeroporto é realizada pela modelagem *logit* (de Luca, 2012). Birolini *et al.* (2019) analisaram através de *logit multinominal* a escolha da forma de acesso terrestre optada por passageiros *low-costs* (LCs) e concluíram que os usuários LCs não se mostraram consumidores de baixo custo com relação à escolha da forma de acesso ao aeroporto.

Zaidan *et al*. (2018) também utilizam o modelo *logit*, levantando hipóteses de incentivos para utilização de transportes públicos para acesso ao aeroporto, uma vez que, 60% dos usuários entrevistados afirmaram estar dispostos à utilização do metrô.

O *Logit Multinominal* é utilizado pois existe duas possibilidades de escolha no presente estudo, e esse possibilita gerar modelos significativos, devido a boa correlação nos testes estatísticos, e possuir parâmetros com valores únicos (Louviere *et al*., 2000). Assim, tanto variáveis pessoais dos usuários como idade, renda etc., quanto variáveis relacionadas à viagem como quantidade de bagagens, motivo da viagem, número de pessoas viajando juntas etc., foram aplicadas no questionário para obtenção de informações sobre o impacto da possível ligação ferroviária.

Para o modelo *logit* foram gerados três cenários, todos considerando a existência de uma ligação ferroviária direta entre a Estação Jabaquara e o Aeroporto de Guarulhos. No cenário 1, a hipótese proposta foi que o passageiro estava viajando sozinho e a lazer. No cenário 2, os passageiros estariam viajando sozinho e para trabalhar. Enquanto no cenário 3 o passageiro estaria viajando com a família. Para cada um desses cenário foram propostas as seguintes condições para a utilização da estação ferroviária de forma a acessar o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos caso essa ligação férrea existisse:

1. Optaria pela escolha do modal caso o dos demais modos de acesso estivesse superior ao preço do acesso ferroviário;
2. Optaria pela escolha do modal se o tempo de acesso por meio do transporte ferroviário fosse inferior aos demais;
3. Optaria pelo acesso por meio de ferrovia se estivesse viajando sem bagagem para despachar (malas de 23kg);
4. Optaria pelo transporte ferroviário como acesso ao aeroporto se não estivesse viajando em horários de grande movimentação dos metrôs de São Paulo;

5. Optaria pelo transporte ferroviário como acesso caso o transporte fosse visto como seguro para o passageiro;

6. Não optaria por esse modal de acesso ao Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos.

Segundo Train (2013), o modelo *logit* segue uma distribuição do tipo Gumbel e esclarece que os valores observados Ɛij (termo aleatório de função) da função utilidade são independentes e distribuídos igualmente. Assim, a equação utilizada para definição da significância de cada uma das variáveis dependentes está apresentada na equação (2):

$$Bx=B1*Renda + B2*Idade + Eij \quad (2)$$

Em que: Bx é a função utilidade do modelo, renda é uma variável que apresenta o valor da renda do participante do questionário e idade é corresponde à idade do passageiro.

Definida as variáveis e a metodologia a ser aplicada, para análise dos dados e obtenção das estimativas do modelo, foi aplicado em uma segunda análise o modelo *logit multinomial*, sendo a função utilidade apresentada na Equação 2, de forma a verificar dentre a variável renda e idade qual era relevante para cada uma das respostas obtidas no questionário.

3.3. Resultados e Discursões

De acordo com os resultados da pesquisa, a Tabela 1 apresenta uma análise descritiva do modelo de regressão linear, considerando as variáveis distância terrestre, tempo de acesso ao aeroporto, quantidade de voos oferecidos e tarifa aeroportuária como independentes, e idade e renda dos participantes do questionário como variável dependente. A coluna (1) relata as variáveis utilizadas, a coluna (2) imprime os coeficientes de aplicação do modelo, e a coluna (3) e (4) fornece a significância estatística das variáveis, sendo essas mais significantes quanto maior for os valores de razão-t e menor for os valores de p-valor.

Tabela 1 Resultados da modelagem

Variável dependente: Idade	**coeficiente**	**razão-t**	**p-valor**	
Constante	25,44	12,02	0,00	***
Distância Terrestre	-1,95	-1,23	0,22	
Tempo de Acesso ao Aeroporto	-0,12	-0,08	0,94	
Quantidade de Voos Oferecidos	3,21	2,11	0,04	**
Tarifa Aeroportuária	-3,46	-2,25	0,03	**
Variável dependente: Renda	**coeficiente**	**razão-t**	**p-valor**	
Constante	4787,69	6,72	0,00	
Distância Terrestre	197,35	0,37	0,71	
Tempo de Acesso ao Aeroporto	358,37	0,68	0,50	
Quantidade de Voos Oferecidos	232,24	0,45	0,65	
Tarifa Aeroportuária	-559,55	-1,08	0,28	

Ao avaliar a tabela 1, pode-se notar que quando consideramos a variável idade como dependente na modelagem, apenas a quantidade de voos oferecidos e a tarifa aeroportuária mostraram-se relevantes, de forma que quanto maior for a idade, os aeroportos com maios ofertas de voos são mais relevantes, assim como quanto maior for a idade, menos relevante é a tarifa aeroportuária na escolha de um aeroporto, uma vez que o coeficiente apresenta sinal negativo no modelo.

Para o cenário 2, nenhuma variável mostrou-se relevante no modelo. Entretanto, a distância terrestre, o tempo de acesso ao aeroporto e a quantidade voos oferecidos apresentaram sinal positivo na modelagem, indicando que quanto maior a renda mais importante são esses fatores. Por sua vez, assim como no cenário 1, a tarifa aeroportuária torna-se menos importante na escolha aeroportuária à medida que a renda aumenta, uma vez que apresenta sinal negativo.

Para a segunda análise, cada uma das condições de escolha para cada um dos três cenários propostos foi aplicada como variáveis dependentes numa modelagem de *logit multinomial*, que utilizou como variável independente a renda e a idade dos

participantes do questionário, visando identificar qual das duas variáveis apresentavam relevância em cada uma das situações propostas.

A Tabela 2 imprime os resultados da modelagem utilizando *logit multinomial* no cenário 1, onde os passageiros estão viajando sozinho e a lazer.

A análise da Tabela 3 sugere que a hipótese nula pode ser rejeitada apenas para a variável renda quando a variável dependente valor dos demais modos de acesso estivessem superiores ao preço do acesso ferroviário for aplicada e para a constante na situação do tempo de acesso por meio do transporte ferroviário fosse inferior aos demais, quando o passageiro estiver viajando sem bagagem para despachar e quando o interrogado não optar por esse modo de acesso. Assim, pode-se concluir que quanto maior a renda menos relevante é valor dos demais modos de acesso na escolha do transporte ferroviário para acessar o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos.

O cenário 3, que por sua vez relata a ocasião de um passageiro viajando com sua família, tem como resultados da modelagem os valores apresentados na Tabela 4.

De forma a verificar dentre os critérios propostos quais deles era mais relevantes para o cenário 3, que considera uma viagem com família, verifica-se na Tabela 4 que a hipótese nula pode ser considerada para renda, quando a variável dependente valor dos demais modos de acesso estivessem superiores ao preço do acesso ferroviário, tempo de acesso por meio do transporte ferroviário for inferior aos demais e não optaria por esse modo de a acesso forem aplicadas, de modo que quanto menor for a renda, mais relevante é o preço do transporte e o tempo de acesso ao terminal. Em contrapartida, quanto maior for a renda, maior é a chance de não se optar por essa escolha de modo de acesso ao .

Tabela 2 Resultados Logit Multinomail - Cenário 1

Variável dependente: Demais modos de acesso estivessem superiores ao preço do acesso ferroviário.					**Variável dependente: Se o tempo de acesso por meio do transporte ferroviário fosse inferior aos demais.**				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	1,1048	0,1234		Variáveis Independentes	const	0,6016	0,4275	
	Renda	-0,0002	0,0551	*		Renda	0,0000	0,6955	
	Idade	-0,0053	0,8469			Idade	0,0006	0,9832	
Variável dependente: Se estivesse viajando sem bagagem para despachar.					**Variável dependente: Se não estivesse viajando em horário de grande movimentação no transporte ferroviário.**				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	-0,8476	0,2740		Variáveis Independentes	const	-1,0211	0,1692	
	Renda	0,0000	0,9190			Renda	0,0000	0,6472	
	Idade	-0,0037	0,9035			Idade	0,0479	0,1165	
Variável dependente: Caso o transporte fosse visto como seguro para o passageiro.					**Variável dependente: Não optaria por esse modo de acesso.**				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	-0,8118	0,2697		Variáveis Independentes	const	-4,9719	0,0306	**
	Renda	0,0000	0,9009			Renda	0,0004	0,0620	*
	Idade	0,0381	0,2007			Idade	-0,0413	0,6027	

Tabela 3 Resultados Logit Multinomail - Cenário 2

Variável dependente: Demais modos de acesso estivessem superiores ao preço do acesso ferroviário.					**Variável dependente: Se o tempo de acesso por meio do transporte ferroviário fosse inferior aos demais.**				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	0,2923	0,6880		Variáveis Independentes	const	1,6321	0,0404	***
	Renda	-0,0002	0,0477	**		Renda	0,0000	0,7614	
	Idade	0,0081	0,7758			Idade	-0,0140	0,6384	

Variável dependente: Se estivesse viajando sem bagagem para despachar.					Variável dependente: Se não estivesse viajando em horário de grande movimentação no transporte ferroviário.				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	-2,0091	0,0075	***	Variáveis Independentes	const	-0,4073	0,5634	
	Renda	0,0000	0,7976			Renda	-0,0001	0,5353	
	Idade	0,0442	0,1188			Idade	0,0172	0,5297	
Variável dependente: Caso o transporte fosse visto como seguro para o passageiro.					**Variável dependente: Não optaria por esse modo de acesso.**				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	-0,7448	0,2944		Variáveis Independentes	const	-3,6127	0,0581	*
	Renda	0,0000	0,8449			Renda	0,0003	0,1297	
	Idade	0,0232	0,4045			Idade	-0,0423	0,5779	

Tabela 4 Resultados Logit Multinomail - Cenário 3

Variável dependente: Demais modos de acesso estivessem superiores ao preço do acesso ferroviário.					Variável dependente: Se o tempo de acesso por meio do transporte ferroviário fosse inferior aos demais.				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	0,4985	0,4952		Variáveis Independentes	const	1,3453	0,0686	*
	Renda	-0,0002	0,0096	***		Renda	-0,0002	0,0104	**
	Idade	0,0170	0,5540			Idade	-0,0100	0,7243	
Variável dependente: Se estivesse viajando sem bagagem para despachar.					**Variável dependente: Se não estivesse viajando em horário de grande movimentação no transporte ferroviário.**				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	-1,0219	0,2096		Variáveis Independentes	const	0,6876	0,3615	
	Renda	-0,0001	0,4068			Renda	-0,0003	0,0011	
	Idade	0,0104	0,7372			Idade	0,0263	0,3848	
Variável dependente: Caso o transporte fosse visto como seguro para o passageiro.					**Variável dependente: Não optaria por esse modo de acesso**				
		coeficiente	p-valor				coeficiente	p-valor	
Variáveis Independentes	const	-1,4387	0,0491	**	Variáveis Independentes	const	-3,4955	0,0006	***
	Renda	0,0000	0,8594			Renda	0,0003	0,0020	***
	Idade	0,0451	0,1191			Idade	-0,0017	0,9631	

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se avaliar inicialmente quais fatores são mais relevantes para a escolha aeroportuária por meio de variáveis levantadas através de um questionário aberto na internet em junho de 2022. Em uma segunda análise, considerando uma suposta implementação de uma ligação ferroviária entre o sul da região da Grande São Paulo (Estação Jabaquara) e o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos verificou-se através da aplicação do *logit multonomial*, para cada um do cenário analisado, sendo o primeiro considerando uma viagem sozinho e a lazer, o segundo considerando uma viagem sozinho à negócios e o terceiro considerando uma viagem com família, quais foram os fatores mais relevantes para consideração da utilização do transporte ferroviário para acesso terrestre ao aeroporto de SBGR.

No tocante à análise dos fatores mais relevantes para a escolha de um terminal aeroportuário, por meio da utilização de regressão pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), com utilização do software *Gretl*, verificou-se que considerando a idade como variável dependente, somente a quantidade de voos oferecidos e a tarifa aeroportuária foram relevantes no modelo, de forma que quanto maior for a idade menos relevante é a tarifa aeroportuária para escolha do terminal de passageiros a ser utilizado, e quanto maior for a variável dependente idade, mais relevante é o crescimento do número de voos oferecidos no terminal para a escolha do aeroporto. No que refere a variável renda, nenhuma das variáveis dependentes aplicadas apresentaram significância no modelo.

Para determinação das variáveis mais relevantes na utilização do transporte ferroviário como ligação terrestre ao Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos, o modelo *logit multinomial* foi aplicado em três cenários, considerando como variável independente a renda e a idade do participante do questionário, e variável dependente cada uma das respostas coletadas no questionário em cada um dos cenários.

No cenário 1, que considera um passageiro viajando sozinho e a lazer, pode-se concluir que quanto maior a renda menor é a relevância do valor dos demais modos de acesso ao Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos e menos pessoas estariam aptas a utilizar o transporte ferroviário para acessar o aeroporto quanto maior fosse sua renda. Para o cenário 2, onde o passageiro estaria viajando a negócios, somente a renda apresentou significância, e quanto maior for o seu valor, menos relevante é valor dos demais modos de acesso na escolha do transporte ferroviário para acessar o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. Para o cenário 3, a variável renda também foi a única que apresentou relevância no modelo, de forma que quanto menor for a renda, mais relevante é o preço do transporte e o tempo de acesso ao terminal, enquanto, quanto maior for a renda, maior é a chance de não se optar por essa escolha de modo de acesso terrestre ao aeroporto.

O trabalho permite reforçar a temática da escolha do acesso ferroviário como modo de transporte de ligação terrestre com o terminal aeroportuário, de forma a verificar o impacto da implementação de uma ligação ferroviária entre o sul da cidade da Grande São Paulo com o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos. Entretanto somente a variável renda mostrou relevância na escolha desse modo de acesso terrestre ao terminal, podendo essa impactar de forma positiva na mudança de demanda do Aeroporto Internacional de São Paulo/ Guarulhos e de forma negativa na demanda do Aeroporto de São Paulo/Congonhas, que se encontra localizado no sul da Grande São Paulo, caso a ligação ferroviária fosse implementada. Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos a partir dessa temática, de forma a utilizar outras variáveis independentes no modelo, visando identificar outros fatores que podem implicar na escolha do transporte ferroviário para acesso aos terminais. O estudo por sua vez apresentou dificuldade no tocante a coleta de dados, uma vez que o questionário só esteve disponível na internet por 15 dias, apresentando limitação no número de amostras coletadas para modelagem.

References

Alhussein, S. N., A. (2011). Analysis of ground access modes choice king khaled international airport, riyadh, saudi arabia. *Journal of Transport Geography , Elsevier, v. 19, n. 6, p. 1361–1367.*

ANAC. (2020). *Agência Nacional de Aviação Civil. Mercado aéreo em 2019: maior número de passageiros transportados da série histórica*. Acesso em: 21 abr, 2022, from https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2020/mercado-aereo-registra-maior-numero-de-passageiros-transportados-da-serie-historica

Bettini, H.F.A.J. e A.V.M. Oliveira (2016). Two-sided platforms in airport privatization. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev. 93, 262–278. https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.06.003*

Birolini, S. *et al*. (2019). Access mode choice to low-cost airports: Evaluation of new direct rail services at milan-bergamo airport. Transport Policy , Elsevier, v. 73, p. 113–124.

Cheung, T.K.Y.; W. Wong; A. Zhang e Y. Wu (2020). *Spatial panel model for examining airport relationships within multi-airport regions. Transp. Res. Part A Policy Pract. 133, 148–163. https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.011*

de Luca, S. (2012). Modelling airport choice behaviour for direct flights, connecting flights and different travel plans. J. Transp. Geogr. 22, 148–163. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.006

Domingos C. *et al*.(2020). Análise dos fatores que influenciam a escolha aeroportuária no Nordeste do Brasil. Acesso em: 23 abr 2022. Disponível em: http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Gest%C3%A3o%20de%20Transportes/Gest%C3%A3o%20de%20Transporte%20II/3_52_AC.pdf

Eurostat (2019). Air passenger transport in the EU. Acesso em 05 mai 2022. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/10265946/7-06122019-AP-EN.PDF/8f2c9d16-c1c4-0e1f-7a66-47ce411faef7.

Jimenez, E.; J. Claro e J.P. Sousa (2014) The Airport Business in a Competitive Environment. Procedia - Soc.Behav. Sci. 111, 947–954. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.129

LabTrans, 2021. Laboratório de Transporte e Logística. Movimentação. Disponível em: https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/?auth=s#Movimentacao/Desempenho

Lieshout, R. (2012) Measuring the size of an airport's catchment area. J. Transp. Geogr. 25, 27–34. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.07.004

Louviere, J. J.; D.A. Hensher e J.D. Swait (2000) Stated choice methods. Cambridge University Press

Mckinsey & Company. Estudo do setor de transporte aéreo do Brasil: relatório consolidado. Rio de Janeiro, 2010. Acesso em: abr, 2022.Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Apoio_a_estudos_e_pesquisas/BNDES_FEP/prospeccao/chamada_aereo.html.

Murça, M. C. R. e A.R. Correia (2013) Análise da modelagem da escolha aeroportuária em regiões de múltiplos aeroportos. Journal of Transport Literature, vol. 7, n. 4, p. 130-146.

Nyckiel, T. (2021), Histórico das concessões aeroportuárias e a necessidade de avanço do programa para os aeroportos regionais delegados aos estados e municípios. Disponível em: <https://portal.airconnected.com.br/2021/09/10/historico-das-concessoes-aeroportuarias-e-avanco-programa-aeroportos/>.Acesso em: abr, 2022.

Paliska, D.; S. Drobne; G. Borruso; M. Gardina e D. Fabjan (2016) Passengers' airport choice and airports' catchment area analysis in cross-border Upper Adriatic multi-airport region. J. Air Transp. Manag. 57, 143– 154. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.07.011

Statistics Canada (2022). Air passenger traffic at Canadian airports, annual. Disponível em: https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=2310025301.

Tretheway, M. e I. Kincaid (2005) Competition between airports in the new Millennium: what works, what doesn't work and why. 8th Hambg. Aviat. Conf. 1–18.

T Tsamboulas, D. A.; Nikoleris, A. (2008) Passengers' willingness to pay for airport ground access time savings. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Elsevier, v. 42, n. 10, p. 1274–1282.

United States Department of Transportation (2020). 2018 Traffic Data for U.S Airlines and Foreign Airlines U.S. Flights. Disponível em: https://www.bts.dot.gov/newsroom/2018-traffic-data-us-airlines-and-foreign-airlines-us-flights.

Yosimoto, V.; R. Chambarelli; B. Mattos; P. Oliveira; F. Camacho e H. Pinto (2016) A lógica atual do setor aeroportuário brasileiro. Revista do BNDES, p. 243-292.

Zaidan, E.; Abulibdeh, A. (2018) Modeling ground access mode choice behavior for hamad international airport in the 2022 fifa world cup city, doha, qatar. Journal of Air Transport Management, Elsevier, v. 73, p. 32–45.

UTILIZAÇÃO DO MODELO LOGIT BINOMIAL PARA DETERMINAÇÃO DE PROBABILIDADE DE ATRASO DE VOOS EM AEROPORTOS BRASILEIROS

Wellington Luiz Rocha da Silva Filho, Evandro José da Silva, Marcelo Xavier Guterres, Mauro Caetano , Viviane Adriano Falcão
Aeronautics Institute of Technology (ITA)

*** Corresponding author e-mail address**: wellington.filho@ga.ita.br

PAPER ID: SIT152

ABSTRACT

The meteorological factors and those arising from the increase in passenger's movement are crucial in air traffic operations. These factors can impact in demand and operational capacity of an airport, this leads to a reduction in on-time performance and can lead to additional costs, which can lead to additional costs and losses for operators. For this reason, understanding the factors that cause delays in on-time flights increases management efficiency and reduces the likelihood of disruptions in the airline system. Therefore, this study investigates the impacts of Weather weather and non-weather conditions, associated with peak passenger's movement periods and seasons, on the probability of aircraft arrival delays using the cases of at Palmas/TO International Air Airport (SBPJ), São Paulo/SP International Airport (SBGR), Manaus/AM International Airport (SBEG), Belém/PA International Airport (SBBE), and Recife/PE International Airport (SBRF). For this analysis, a historical series of predicted and actual landing times and meteorological and non-weather data were used and the impact of these variables on the probability of a delayed landing was estimated using a binomial logit model.

Keywords: Air Transport; Climate, Binomial logit, Meteorology; Weather.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transporte aéreo corresponde tanto ao aeroporto como as operações. Dessa forma, define-se que uma rede transporte aéreo consiste na junção entre os aeroportos, compreendidos como os nós da rede, e as operações e voos dizem respeito as ligações e ramificações desse sistema, atuando na ligação desses aeroportos (JANIC, 2015). Assim, quando fatores inesperados impactam nessas ligações, a rede por completo é prejudicada, visto que alguns problemas não incapazes de serem trados imediatamente, gerando efeito na cadeia como um todo (Santos *et. al*, 2019).

Os problemas de interrupção na rede de transporte aéreo causaram, nos últimos anos, atrasos em pousos e decolagens de aeronaves e tornaram-se um fator predominante em aeroportos mundiais. Dessa forma, o desempenho pontual, é um fator significante na identificação das companhias e aeroportos com melhor desempenho em operações, sendo então importante na análise do transporte aéreo, uma vez que a pontualidade das operações corrobora na escolha do consumidor e consequentemente nos custos e nas receitas das operadoras aeroportuárias (Oliveira *et al*, 2020).

Dita a relevância de tornar as operações aeroportuárias pontuais, os atrasos e cancelamentos de voos são alguns dos problemas primordiais na interrupção das operações da rede de transporte aéreo. Algumas interferências na rede são incapazes de serem determinadas, entretanto, eventos meteorológicos inesperados podem ser um fator crucial no impacto da pontualidade das operações. Entre esses eventos, segundo Santos *et al*. (2019), a oscilação dos índices pluviométricos pode ser considerada como um fator de alto impacto nas operações aeroportuárias.

São diversos os fatores operacionais e estruturais capazes de afetar a pontualidade dos voos, e segundo Chen e Wang (2019) o clima é um dos fatores cruciais nessa análise, visto que os autores analisam o impacto dos fatores meteorológicos nas operações de aviação e ferroviárias para os principais pares de cidades da China e constaram que os efeitos climáticos impactam de forma significativa nos modais.

Dito que os atrasos em voos acarretam vários custos para companhias aéreas, passageiros e sociedade, muitas pesquisas dedicam-se a análise de atrasos em voos e ao desenvolvimento de estratégias que podem ajudar a mitigá-los. Parte desses estudos tem como objetivo verificar os efeitos do clima e suas relações com as operações aeronáuticas, analisando o impacto desses fatores no desempenho das operações. Esse conhecimento pode ser utilizado para prever as consequências do clima, para um melhor a decisão e buscas de melhorias para evitar as ocorrências de atrasos, visto que em um cenário global o tráfego aéreo apresenta um grande crescimento, o que impulsiona a busca pela otimização do sistema.

Nesse contexto, o objetivo do então estudo é verificar como as condições climáticas da superfície do sítio aeroportuário juntamente com fatores não meteorológicos associados as estações do ano e períodos de maiores movimentações de passageiros impactam na probabilidade de atrasos no pouso das aeronaves em cinco aeroportos capitais brasileiros. Para a análise, foi feita a ligação dos dados de pontualidade de voos de uma série histórica em um período de um ano com os dados advindos de relatórios meteorológicos e de forma a ser estimado por meio de um modelo *logit binomial* o impacto das variáveis introduzidas na modelagem sobre a probabilidade de uma chegada em atraso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os fatores meteorológicos são fundamentais para análise atrasos de voos. Por essa razão, muitos estudos analisam as influências desses fatores na pontualidade da chegada e partida de uma aeronave. Segundo Abdel-Aty *et al*. (2007), os atrasos na chegada de voos apresentam uma forte correlação com as condições meteorológicas no aeroporto de origem/destino ou durante sua trajetória de voo. Na Europa, aproximadamente metade de todos os atrasos na aviação regular dos aeroportos são causados devido as adversidades climáticas e, chegando a atingir mais de 95% na Áustria (Steinheimer *et al*., 2019).

De forma geral, Abdelghany *et al*. (2004) demonstraram que aproximadamente 75% dos atrasos no tráfego aéreo ocorrem devido as condições meteorológicas adversas, uma vez que devido as ocorrências na variação climática, a

capacidade do aeroporto passa a ser reduzida, implicando na necessidade de um aumento nas separações de aeronaves de forma a garantir segurança no pouso das aeronaves. Uma vez que a pesquisa apresenta características associadas aos fatores climáticos e os atrasos em aterrissagens de aeronaves, essa torna-se um importante referencial para o presente estudo.

Assim sendo, muitos estudos analisam a influência dessas adversidades nas operações de voo. Entretanto, tais estudos comumente analisam o impacto no atraso de chegada de voos em um único aeroporto (Abdel-Aty *et al*., 2007; Markovic *et al*., 2008; Wesonga, 2012; Santos *et al*., 2018; Steinheimer *et al*., 2019).

O estudo de Abdel-Aty *et al*. (2007), por exemplo, associa variáveis meteorológicas com variáveis não climáticas e apresenta fatores que estão associados as frequências de atrasos de voos domésticos sem escala no Aeroporto Internacional de Orlando (KMCO), Estados Unidos da América, durante os anos de 2002 e 2003, obtendo como resultado que os atrasos nas chegadas estão associados a hora do dia, dia da semana e estação do ano, além de fatores como distância do voo, precipitação e intervalos de tempo programados entre voos sucessivos eram fatores significativos que afetavam a pontualidade de chegada dos voos.

Dita a necessidade de entender como efeitos climáticos impactam o transporte aéreo, Markovic *et al*. (2018) avaliam o impacto do clima na pontualidade de chegadas e partidas de voos no Aeroporto de Frankfurt (EDDF), na Alemanha. Para a avaliação, fez-se utilidade de um modelo de regressão híbrido (linear e logarítmico) através de uma série temporal que utiliza dados anuais do período de 2001 até 2006, incluindo o fluxo de tráfego, o estado do sistema aeroportuário e o clima local como componentes capazes de ocasionar um atraso, demonstrando que, em mais de metade dos modelos estudados, as variáveis climáticas se mostraram estatisticamente significativas nas ocorrências de atrasos na chegada de aeronaves. No estudo, das 13 adversidades de clima identificadas, a visibilidade, velocidade do vento, nível de base das nuvens (altitude mais baixa da parte visível da nuvem) e a neve representam os principais fatores de impactos climáticos na pontualidade de chegada e partidas dos voos.

Analisando também um aeroporto europeu, Steinheimer *et al*. (2019) estudam como caso o Aeroporto Internacional de Viena (LOWW), denominado um dos 20 principais aeroportos em número de atrasos da Europa, e quantificou o impacto do mau tempo no aeroporto através da derivação da avaliação de atrasos no tráfego e custos relacionados a partir de simulações de tempo rápido.

Dito a transcendência de analisar os efeitos climáticos nas regiões dos sítios aeroportuários, Santos *et al*. (2018) tomam como referência o Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos (GRU) e estabeleceram uma previsão da relação das taxas de precipitação acumulada com as informações de cancelamentos e atrasos de voos. Os dados pluviométricos coletados foram obtidos do ano de 2011 a 2015. O estudo demonstra, com base nos dados utilizados, que existe um aumento de aproximadamente 14% na quantidade de ocorrências de cancelamentos e atrasos, no período de 2016 a 2020 projetado, advindos das precipitações registradas.

Os problemas de atrasos em pouso associados a fatores climáticos também estão presentes nos aeroportos localizado no continente africano, por essa razão Wesonga *et al*. (2012) analisaram atrasos em solo e espera aérea no Aeroporto Internacional de Entebbe (HUEN) por um período de cinco anos, fazendo utilidade de uma abordagem paramétrica múltipla para determinação da probabilidade de atraso de uma aeronave, incluindo parâmetros meteorológicos em sua análise.

Por outro lado, alguns estudos também se encarregam de analisar uma rede viária de aeroportos (Borsky e Unterberger, 2019; Oliveira *et al*., 2021). Borsky e Unterberger (2019) analisaram um conjunto de dados com 2,14 milhões de partidas dos dez principais aeroportos dos Estados Unidos da América (EUA) no período de janeiro de 2012 até setembro de 2017, concluindo que eventos como precipitação, vento, neve e temperaturas amenas apresentam um impacto significativo nos atrasos de partida. Adicionalmente, observou-se que para eventos adversos como chuva e queda de neve, os atrasos na partida aumentam de 10 a 23 minutos, enquanto o atraso tende a ser entre 1 e 3 minutos para caso de ventos fortes.

De forma resumida, a Tabela 1 a seguir apresenta as variáveis climáticas utilizadas para

determinar a probabilidade de atrasos associadas a efeitos adversos meteorológicos analisas no presente estudo.

Tabela 1 Dados Meteorológicos Estudados na Literatura

Autores	Dados Meteorológicos Estudados
Borsky e Unterberger (2019)	Precipitação (mm), temperatura (ºC) e vento (m/s)
Chen e Wang (2019)	Eventos Climáticos Extremos (Furacões e Tempestades) (dummy)
Koetse e Rietveld (2009)	Alterações climáticas e Eventos Extremos (Inundações e Aumento do nível do mar (cm))
Markovic *et al*. (2008)	Temperatura (ºc), Visibilidade (m), Vento (m/s) e cobertura de neve (cm).
Oliveira *et al*. (2021)	Chuva (mm), Rajada de vento (kt), Visibilidade vertical e teto operacional (m).
Santos *et al*. (2018)	Precipitação (mm)
Autores	Dados meteorológicos estudados
Borsky e Unterberger (2019)	Precipitação (mm), temperatura (ºC) e vento (m/s)
Chen e Wang (2019)	Eventos Climáticos Extremos (Furacões e Tempestades) (dummy)
Koetse e Rietveld (2009)	Alterações climáticas e Eventos Extremos (Inundações e Aumento do nível do mar (cm))

Com o intuito de determinar os efeitos das adversidades climáticas no setor aéreo brasileiro, Oliveira *et al*. (2021) investigaram como os choques climáticas na região de um aeroporto afeta a probabilidade de atrasos nos voos domésticos do sistema de transporte aéreo nacional, concluindo que fatores como visibilidade, precipitação e rajadas de ventos favorecem o atraso de chegada e partida das aeronaves.

Além dos fatores meteorológicos, o estudo de Abdel-Aty *et al*. (2007), que detectou a frequência de padrões de atrasos e identificou os fatores associados as frequências de atraso, constata que o aumento na demanda de transporte aéreo também é um fator causador de atraso nos voos. Por essa razão, conforme apresentado nos estudos supracitados, o fator climático é um possível responsável na causa de atraso nas chegadas das aeronaves, juntamente com fatores associados a maior movimentação de passageiros em determinados períodos do ano (sazonais). Sendo assim, torna-se importante uma análise mais ampla associando a junção desses fatores voltados aos aeroportos brasileiros, visando entender como tais variáveis impactam o setor aéreo.

3. METODOLOGIA

O presente estudo consiste em utilizar o modelo *logit* binário para determinação da probabilidade de atraso na chegada de um voo, levando em consideração fatores meteorológicos e as estações do ano, bem como a temporada de maior demanda por transporte aéreo. Inicialmente foram definidas as variáveis apropriadas para o desenvolvimento do estudo. Para esse estudo, utilizou-se algumas das variáveis mencionadas no referencial teórico.

Com base em efeitos climáticos adversos analisados em estudos anteriores, o então estudo utilizou variáveis meteorológicas já mencionadas na literatura, juntamente com variáveis não climáticas (período de alta temporada, onde se aumenta a demanda por transporte aéreo, e as estações do ano) de forma a entender se combinadas essas podem causar atraso no horário previsto de pouso de uma aeronave em um determinado aeroporto. Assim sendo, para a pesquisa em questão foram definidas as seguintes variáveis de entrada a fim de determinar o impacto delas na probabilidade de atraso na chegada de um voo: visibilidade, velocidade do vento, e temperatura que já foram aplicadas em estudos anteriores, e as variáveis não climáticas estações do ano e alta temporada do ano (meses de férias: janeiro, fevereiro, julho, novembro e dezembro).

Definidas as variáveis, foram levados em consideração os cinco aeroportos localizados nas capitais que apresentaram maiores valores de atraso médio mensal que, consequentemente, resultam nos maiores valores de atraso médio anual, sendo considerados os dados de maio de 2020 até maio de 2021, referentes a cinco aeroportos brasileiros, totalizando 78.055 observações (CGNA, 2019).

Para determinação do atraso médio anual, foram analisados os valores médios de atrasos mensais, considerando que um voo estava em atraso quando seu tempo extrapola em 30 minutos do horário previsto de decolagem, e foi feita uma média aritmética, de forma a porcentagem do atraso médio anual, com base nos dados mensais. Os aeroportos selecionados para o estudo são: Aeroporto Internacional de Palmas/TO (SBPJ), Aeroporto Internacional de São Paulo/SP (SBGR), Aeroporto Internacional de Manaus/AM (SBEG), Aeroporto Internacional de Belém/PA (SBBE) e Aeroporto Internacional de Recife/PE (SBRF). As médias mensais de atrasos em 2019 nesses aeroportos podem ser identificadas na Figura 1, e na Figura 2 estão apresentadas as medias anuais de atrasos dos aeroportos mencionados e suas devidas localizações geográficas.



Figura 1 Localização dos aeroportos de estudo e seus atrasos médios anuais. Fonte: Google Earth, adaptado de CGNA (2019).

Os dados referentes aos históricos horários de pousos e decolagens dos aeroportos estudados, foram coletados no banco de dados TATIC (Total Air Traffic Information Control) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA (2019) e são determinantes na definição de pontualidade e atraso de pouso.

No que diz respeito às variáveis relacionadas a meteorologia, essas foram obtidas no inventário de dados meteorológicos fornecidos pela Rede Meteorológica do Comando Aeronáutico (REDEMET, 2019). Neste repositório, foi feita a coleta do histórico de Aviation Routine Weather Reports (METARs) para os aeródromos analisados. O METAR é um relatório meteorológico padrão, que demonstra as condições de tempo e clima atuais a cada hora de um determinado aeroporto. O relatório supracitado fornece informações como temperatura, clima, pressão atmosférica, velocidade do vento e visibilidade (Oliveira *et al*., 2021). Em caso de mudanças climáticas inesperadas, relatórios especiais também são disponibilizados, caso as ocorrências aconteçam em horários que não coincidem com os do METAR (Oliveira *et al*., 2021). Isto posto, as variáveis de caráter meteorológico utilizadas como input na pesquisa foram obtidas por meio do banco de dados fornecido pela REDEMET (2019).

Define-se o período de maior procura por transporte aéreo ao longo do ano no então estudo de alta temporada, sendo esse o período que diz respeito aos meses de férias e verão no Brasil, abrangendo então os meses de janeiro, fevereiro, julho, novembro e dezembro.

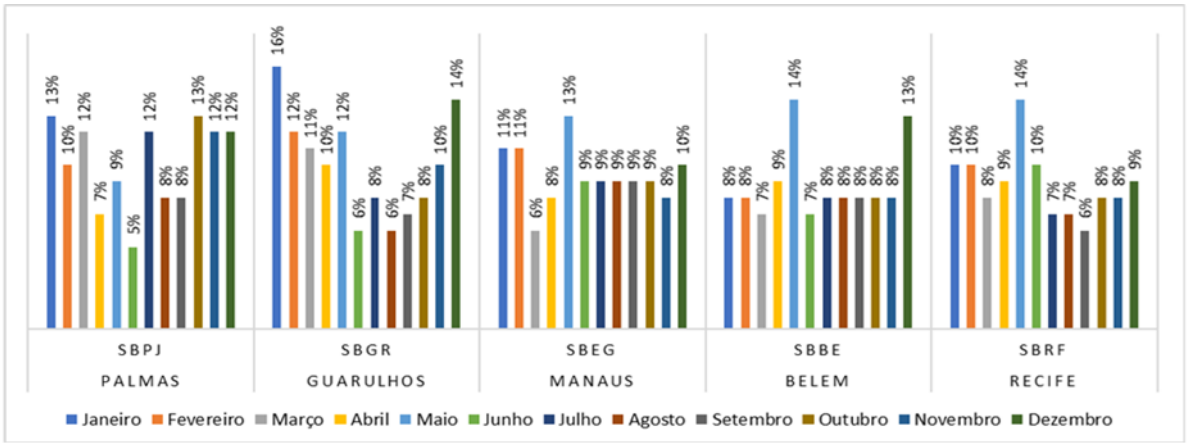


Figura 2 Médias mensais de atraso na aviação comercial em 2019.
Fonte: Adaptado de CGNA (2019).

Com o objetivo de não enviesar a modelagem, e levando em consideração que o Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo do CGNA (2019) define que uma aeronave está com atraso quando o tempo extrapola 30 minutos em sua partida, foi considerado que somente após esse tempo um voo seria registrado com atraso tanto na decolagem quanto no pouso, uma vez que a porcentagem de atraso do relatório fornecido pelo Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea (2019) tomou como base essa análise.

Visando excluir os impactos dos erros de relato observados no banco de dados, foram removidos os voos que apresentassem atrasos superiores a 5 horas, reduzindo assim o espaço amostral da pesquisa.

Isto posto, para determinação da probabilidade de atraso no pouso de um voo associado a uma das variáveis escolhidas no estudo, fez-se utilidade do modelo *logit* binário, visto que somente existe possibilidade ou do voo está atrasado, ou dele está pontual. O *logit* binário foi escolhido também pois é capaz de gerar modelos significativos devido a boa correlação nos testes estatísticos e conter com um conjunto estimado de parâmetros com valores únicos, além de ser o método mais utilizado em estudos de planejamento de sistemas aeroportuários (de Luca, 2012).

Segundo Train (2013), o modelo *logit* segue uma distribuição do tipo Gumbel e esclarece que os valores observados Ɛij (termo aleatório de função) da função utilidade são independentes e distribuídos igualmente. Assim, conforme Oliveira *et al*. (2021), a equação do modelo *logit* para estimar a probabilidade de chegadas atrasadas pode ser representada conforme a equação (1) e a função utilidade do modelo pode ser apresentado conforme a equação (2):

$$p(atraso_{voo}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta^T x + \beta 0)}} = \frac{e^{(\beta^T x + \beta 0)}}{1 + e^{(\beta^T x + \beta 0)}} \quad (1)$$

$$\beta^T x = \beta 1 visib. + \beta 2 Temperatura + \beta 3 Veloc.Vento + \beta 4 temp. + \beta estação + \varepsilon ij \quad (2)$$

Em que: $\beta^T x$ é a função utilidade do modelo, Visib.é uma variável que apresenta a visibilidade, imprimindo valores numéricos em milhas; Temperatura fornece a temperatura na região do aeroporto em graus celsius; Veloc.Vento diz respeito a velocidade do vento na área em análise, e está apresentada em metros por hora (mph); temp. é uma variável binária que apresenta valor de 1 em caso de alta temporada (janeiro, fevereiro, julho, novembro e dezembro) e 0 para os demais meses do ano; estação refere-se as estações do ano (primavera, verão, outono e inverno), adotando-se valores de 1 para outono, 2 para inverno, 3 para primavera e 4 para verão; β é o coeficiente desconhecido relacionado ao atributo; e εij é o termo aleatório da função.

Definida as variáveis e a metodologia aplicada, para análise dos dados e obtenção das estimativas do modelo, foi feita utilidade do modelo *logit* binomial de forma a se determinar a probabilidade de um determinado voo pousar com atrasado levando em consideração inicialmente as variáveis meteorológicas mencionadas anteriormente, e depois levando em consideração tanto essas variáveis como as não climáticas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados do estudo, a Tabela 2 apresenta uma análise descritiva do modelo *logit* binário, considerando apenas as variáveis climáticas. A coluna (1) demonstra as variáveis utilizadas, a coluna (2) apresenta o total de amostras coletadas para cada variável, a coluna (3) dispõe dos coeficientes de aplicação do modelo e a coluna (4) fornece a significância estatística das variáveis, sendo essas mais significantes, quando menor forem seus respectivos p-valor.

Tabela 2 Resultados do modelo estatístico para efeitos meteorológicos.

Variável	Total de Amostras	Coeficientes	P-valor
Const	-	-4,5675	6,79E-262 ***
Visibilidade	78.055	-0,1103	4,66E-08 ***
Temperatura	78.055	0,1026	7,47E-130 ***
Rajada de Vento	78.055	-0,0393	2,13E-14 ***

Nota 1. *p<01; ** p<0,05; ***p<0,01

De acordo com a Tabela 2, nota-se que as variáveis visibilidade e rajada de vento atuam negativamente na pontualidade, visto que essas apresentam sinal negativo no coeficiente, dessa forma, é possível notar que essas variáveis

podem favorecer o atraso de pouso no aeroporto de destino. A variável temperatura, por sua vez apresenta sinal positivo, simbolizando que o aumento da temperatura é favorável a uma chegada pontual.

Ademais essa análise se faz interessante para a questão de visibilidade, dito que se espera que quanto maior a visibilidade, maior a pontualidade na aterrissagem. Entretanto, o fato de o sinal do coeficiente ter apresentado valor negativo para a então análise, pode ser justificado pelo tipo de operação possibilitar as condições de IFR (Instrument Flight Rules) para os aeroportos em estudo.

No tocante à associação das variáveis meteorológicas com as variáveis não climáticas, a Tabela 3, apresenta os resultados estatísticos do modelo levando utilizando também *logit* binomial.

Tabela 3 Resultados do modelo estatístico levando em considerações também variáveis não climáticas

Variável	Total de Amostras	Coeficientes	P-valor
Const	-	-4,1743	3,07E-206 ***
Visibilidade	78.055	-0,1219	1,15E-09 ***
Temperatura	78.055	0,1070	1,17E-140 ***
Velocidade de Vento	78.055	-0,0352	6,85E-12 ***
Temporada (1)	78.055	0,2415	1,19E-07 ***
Estação do Ano	78.055	-0,2252	4,16E-28 ***

Nota 1. *p<01; ** p<0,05; ***p<0,01
(1) Variável binária.

Nota-se, portanto, que as variáveis visibilidade, rajada de vento e estação do ano apresentam sinal negativo na análise, o que define que essas impactam de forma negativa na pontualidade de pouso. No tocante a variável visibilidade, essa pode ser justificada pela questão da operação por instrumentação, conforme mencionado. Em se tratando da variável rajada de vento, espera-se realmente que quanto maior seja seu valor maior também seja a chance de ocorrer um atraso, visto que existem limites de vento de través (cruzado) que uma aeronave pode receber para que seja efetuado o pouso, conforme apresentado na RBAC 154.

Por sua vez, as variáveis temperatura e temporada (meses de maior demanda de transporte aéreo), apresentam sinais positivos, concluindo-se que quanto maior a temperatura, maior a chance de um pouso pontual, e que nos meses de janeiro, fevereiro, julho, novembro e dezembro o pouso pontual também é favorecido, o que se apresenta contrário ao esperado, mas que pode ser justificado pelo fato do aumento na demanda exigir também uma otimização nas operações do aeroporto, tornando o processo de pouso e decolagem mais ágil.

Visto que, o modelo apresentou significância quando levando em consideração também as variáveis não climáticas, esse modelo utilizado para determinação da probabilidade de atraso, uma vez que o objetivo do então estudo é verificar essa chance de ocorrência de atraso associada a combinação dos fatores mencionados. Assim, estimou-se que a probabilidade da ocorrência de atraso, levando em consideração tais variáveis aumenta em 4%, segundo a modelagem utilizada. Dessa forma, pode-se concluir que o então trabalho contribui para a literatura de forma a introduzir que as variáveis meteorológicas combinadas com outras variáveis podem influenciar na probabilidade de atraso no pouso de aeronave em aeroportos brasileiros, o que possibilita as buscas por soluções para resolver o então problema.

Conforme analisado por Abdel-Aty *et al*. (2007), conclui-se que para os aeroportos brasileiros os fatores não climáticos também influenciam na pontualidade de chegada dos voos. Adicionalmente, os fatores meteorológicos que por hora também haviam sido avaliados por Oliveira *et al.* (2021) para o contexto dos aeroportos brasileiros também se mostraram relevantes na análise em estudo. Disso posto, o então estudo contribui para literatura pois engloba em uma mesma modelagem tanto os fatores climáticos como os não climáticos mencionados para os aeroportos que apresentavam maiores médias mensais de atraso no Brasil.

5. CONCLUSÃO

Esse estudo analisou os efeitos das condições climáticas juntamente com fatores não meteorológicos, como estações do ano e alta temporada do ano (meses de férias: janeiro, fevereiro, julho, novembro e dezembro), de forma a definir como esses atributos em conjunto

impactam a probabilidade de atraso de pouso no Aeroporto Internacional de Palmas/TO (SBPJ), Aeroporto Internacional de São Paulo/SP (SBGR), Aeroporto Internacional de Manaus/AM (SBEG), Aeroporto Internacional de Belém/PA (SBBE) e Aeroporto Internacional de Recife/PE (SBRF).

Os aeroportos analisados foram definidos com base no atraso médio mensal disponibilizado pelo Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo do CGNA (2019), de forma que através de uma média aritmética introduziu-se para a análise do então estudo os cinco aeroportos localizados em capitais brasileiras que apresentaram os maiores valores médios de atraso no ano de 2019.

Através do banco de dados TATIC (Total Air Traffic Information Control), disponibilizado pelo DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo obteve-se os históricos dos horários previstos e reais dos voos que pousaram nos aeroportos supracitados no período de maio de 2020 até maio de 2021, totalizando uma amostra de 78.055 observações. Coletadas as informações de pontualidade, juntamente com os dados meteorológicos disponibilizados pela REDEMET e os dados não climáticos estimou-se com base no modelo *logit binomial* as consequências dessas variáveis na pontualidade do pouso das aeronaves nos cinco aeroportos selecionados.

Com base nas análises, conclui-se que os fatores climáticos visibilidade, temperatura e velocidade do vento e os fatores não climáticos intitulados estações do ano e alta temporada do ano aumentam a probabilidade de atraso de pouso das aeronaves em aproximadamente 4%. De forma a complementar a literatura, outros estudos podem considerar o desenvolvimento de uma análise semelhante para atrasos e cancelamentos de voos incluindo efeitos meteorológicos, como, granizo, precipitação e umidade e também aeroportos regionais, de forma a ampliar a análise de probabilidade de atraso levando em consideração novos fatores climáticos, e entender o comportamento de tais fatores para os aeroporto que não estão localizados nas capitais brasileiras.

References

Abdal-Aty, M., Lee, C., Bai,Y., Li, X., & Michalak, M. (2007). Detecting periodic patterns of arrival delay. Journal of Air Transport Management, 13(6), 355–361.doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2007.06.002

Abdelghany, K. F., S. Shah, S., Raina, S., & Abdelghany, A. F (2004). A model for projecting flight delays during irregular operation conditions. *Journal of Transport Management, 10(6), 385-394.* doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2004.06.008

Borsky, S., & Unterberger, C. (2018). J Bad weather and flight delays: The impact of sudden and slow onset weather events. *Economics of Transportation, v.18, 10–26.*doi: 10.13140/RG.2.2.19778.02246

CGNA (2019). Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea. Disponível em: <http://portal.cgna.gov.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2019.pdf >, acesso em: abril de 2021.

Chen, Z., Wang, Y., (2019). Impacts of severe weather events on high-speed rail and aviation delays. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, v.69, 168–183.*. doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.030.

Gretl (2019). GNU Regression, econometric and time-series library (Gretl), Cottrell, A., Lucchetti, R. Software disponível em: http://gretl.sourceforge.net/ , acesso em: abril de 2021.

De Luca, S. (2012). Modelling airport choice behaviour for direct flights, connecting flights and different travel plans. *Journal of Transport Geography, v.22, 148–163.*. doi: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.006

Koetse, M. J., Rietveld, P. (2009). The impact of climate change and weather

on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, v.14, pp 205-221.*. doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.12.004

Markovic, D., Hauf, T., Rohner, P., Spehr, U., (2008). A statistical study of the weather impact on punctuality at Frankfurt Airport. *Meterological Applications, v.15, pp. 293-303...* doi: https://doi.org/10.1002/met.74

Oliveira, M., Eufrásio, A. B. R., Guterres, M. X., Murça, M. C. R., Gomes, R. A, (2021). Analysis of airport weather impact on on-time performance of arrival flights for the Brazilian domestic air transportation system. *Journal of the Transportation Research Board, v.91, 101974.*. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101974

Santos, T. A., Vendrame, I., Alves, C. J. P, Caetano, M., (2018). Modelo de identificação do impacto futuro de chuvas extremas nos atrasos/cancelamentos de voos. *Transportes, v.26, 2237-1346*. doi: https://doi.org/10.1002/met.74

Steinheimer, M., Kern, C., Kerschbaum, M., (2019). Quantification of weather impact on arrival management. *Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar.*

Train, K. E., (2003). Discrete choice methods with simulation. *Cambridge University Press.*

Wesonga, R., Nabugoomu, F., & Jehopio, P. (2012). Parameterized framework for the analysis of probabilities of aircraft delay at an airport. *Modelling transport*, (4 ed.). New, Jersey, USA: John Wiley & Sons.

Robinson, S. (2017). A Tutorial on Simulation Conceptual Modeling. *Journal of Air Transport Management, 23, 1–4.* doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.02.001

.

COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS ACN-PCN E ACR-PCR

Rafael Marques Alves, Cláudia Azevedo Pereira, José Antônio Schiavon.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica.

rafael.alves@ita.ga.br, claudia.azevedo@ita.br, schiavon@ita.br

PAPER ID: SIT206

RESUMO

O presente trabalho apresenta a comparação entre os índices de resistência de pavimentos aeroportuários, *Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number* (ACN/PCN) e *Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating* (ACR/PCR). O primeiro, desenvolvido por um grupo de trabalho da ICAO, em 1977, e utilizado desde então, será totalmente substituído pelo ACR/PCR até 2024, quando todos os países signatários da ICAO devem ter suas estruturas de pavimento de aeroportos classificadas em termos desse novo índice. A utilidade de um índice de resistência de pavimentos aeroportuários é permitir ao operador adequar as cargas e frequências de operação ao pavimento daquele aeródromo, evitando o desgaste prematuro ou até mesmo o colapso em casos extremos. O método ACN/PCN para pavimentos flexíveis tem como base uma metodologia antiga de dimensionamento de pavimentos, que considera esforços de cisalhamento no topo do subleito, equivalência de materiais e carregamentos. Por sua vez, o ACR/PCR se baseia em modelos de dimensionamento atuais, que consideram a deformação no topo do subleito e as características mecânicas de cada material. Dessa forma, apesar das simplificações necessárias ao estabelecimento de um sistema de classificação de resistência, o ACR/PCR aproxima o índice de resistência das características de dimensionamento atuais. Assim, este trabalho faz uma análise comparativa entre os dois índices, através de quatro estudos de caso de pavimentos aeroportuário flexíveis.

Keywords: Pavimentos, Aeródromos, Resistência, ACN/PCN, ACR/PCR.

1. INTRODUÇÃO

Um índice de resistência de pavimentos aeroportuários é uma importante ferramenta dos operadores para a gestão de suas pistas de pouso, taxis e pátios. Ele permite ao operador conhecer não apenas as cargas limites para a operação de cada aeronave, mas também, avaliar a operação de aeronaves com sobrecarga, conhecendo o ônus dessas operações e avaliando seus efeitos na vida de serviço dos pavimentos. Desse modo, é possível gerir de forma eficiente suas estruturas de pavimento, unindo requisitos técnicos aos interesses comerciais e operacionais do aeroporto.

Este índice de resistência de pavimentos aeroportuários precisa ser simples e de fácil entendimento, de modo que seja aceito e amplamente utilizado por todos os países. Isso faz com que a tarefa de estabelecer tal índice seja complexa, e requer algumas simplificações.

Por mais que o índice de resistência seja o processo inverso do dimensionamento, ocorre que, um único índice numérico deve representar os diferentes arranjos de carga dos trens de pouso que incidem nos também diferentes tipos de estrutura de pavimento. O atual ACN/PCN realiza esse procedimento através do método de dimensionamento CBR, substituído quase totalmente pelos métodos de análise linear elástica que figuram nas atuais rotinas de dimensionamento de pavimentos aeroportuários (Fabre & Varus, 2019).

A utilização de métodos diferentes para o dimensionamento e para a obtenção do índice de resistência já mostra uma incompatibilidade entre as duas rotinas. Essa incompatibilidade é acentuada ainda mais por considerações, com respeito aos materiais de pavimentação, presentes no método do CBR.

Com a finalidade de compatibilizar os índices de resistência com os métodos de dimensionamento, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) estabeleceu para 2024, a completa substituição do atual ACN/PCN pelo ACR/PCR (ICAO, 2020).

O objetivo deste trabalho, é comparar os dois índices de classificação, para pavimentos flexíveis, através de quatro estudos de caso, com estruturas de pavimentos flexíveis de pistas de pouso e taxi, e os *mixes* de aeronaves que nelas operam. Os nomes e as localizações dos aeródromos serão aqui omitidos por solicitação dos operadores que forneceram os dados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecessores

Os primeiros métodos de classificação de resistência de pavimentos aeroportuários faziam referência ao carregamento permitido em cada um dos lados do trem de pouso principal (Loizos et al, 2000). À época, havia em operação apenas aeronaves de rodas simples e duplas. A segunda guerra mundial impulsionou o desenvolvimento da indústria aeronáutica, o que levou ao surgimento de aeronaves mais pesadas, e de trens de pouso mais complexos. Então, em 1965 a ICAO estabeleceu o *Load Classification Number* (LCN) como novo índice de classificação de resistência de pavimentos aeroportuários (Loizos & Charonitis, 2004). Aeronaves ainda mais pesadas e com diferentes distribuições de cargas eram desenvolvidas e, em 1977, a ICAO formou um grupo de estudos para o desenvolvimento do método ACN/PCN, que apresentou grandes vantagens sobre seu antecessor LCN (Loizos & Charonites, 2004).

2.2. ACN/PCN

De acordo com a definição da ICAO, o ACN é o número que expressa o efeito relativo de uma aeronave em um pavimento de determinada resistência de subleito. Por sua vez, o PCN é o número que representa a resistência do pavimento para operações irrestritas de uma aeronave de ACN menor ou igual ao PCN (ICAO, 1983).

Estabelecer um índice de resistência numérico simples e direto, diante de tantas variações de trens de pouso, e diferentes materiais e espessuras nas estruturas de pavimento, exige simplificações de ambos os lados desse equacionamento (carregamentos e estruturas de pavimento). Os diferentes tipos de trens de pouso são representados por carregamentos simples e os diferentes tipos de materiais de pavimentação são comparados por meio de fatores de equivalência (FAA, 2014).

Utilizando essas simplificações, o método ACN/PCN permite, através de um índice numérico, avaliar o peso permitido para que uma

aeronave opere em determinado pavimento. Uma estrutura de pavimento é dimensionada para o trem de pouso de cada aeronave e, em seguida, calcula-se a carga de roda simples que gere a mesma tensão de cisalhamento à altura do topo do subleito, em comparação com as mesmas características do trem de pouso original. A esse carregamento dá se o nome de carga de roda simples equivalente, que tem sua pressão de pneus fixada em 1,25 Mpa (ICAO, 1983).

Outra simplificação importante do método diz respeito à resistência do subleito. Os valores de ACN e PCN são, então, calculados para quatro níveis de resistência de subleito. Sendo estes, valores de referência para faixas de resistência conforme Tabela 1 adaptada da FAA (2014) .

Tabela 1: Faixas de resistência e seus valores de referência para o ACN/PCN.

Código	Resistência do subleito	CBR (%)	
		Faixas	Referência
A	Alta	CBR ≥ 13	15
B	Média	8< CBR < 13	10
C	Baixa	4 < CBR < 8	6
D	Ultra baixa	CBR ≤ 4	3

Cada aeronave possui quatro valores de ACN, calculados pelo dimensionamento de uma estrutura de pavimento tipo, para o seu peso máximo de operação, e distribuição de carga que gere o maior carregamento no trem de pouso principal da aeronave. Essa estrutura é dimensionada para 10.000 operações (ICAO, 1983).

Para o cálculo do PCN o que se tem são as estruturas de pavimento existentes, e o conjunto (*mix*) de aeronaves que operam ou irão operar naquele aeródromo. O subleito é representado pela resistência de referência, e a estrutura do pavimento é convertida na estrutura tipo. Em função dos pesos e frequência de operação das aeronaves, e da espessura de pavimento, resultado da conversão, é obtida a carga de roda simples que gera a mesma tensão de cisalhamento no topo do subleito, em comparação com o trem de pouso da aeronave (FAA, 2014).

Esse processo é realizado para cada uma das aeronaves do *mix*, e em seguida, através do *Cumulative Damage Factor* (CDF), as operações de todas as aeronaves são convertidas em operações da aeronave crítica. O valor do PCN é a carga de roda simples equivalente da aeronave crítica, em kg x 10^{-3}, e multiplicada por dois (FAA, 2014).

O ACN/PCN exige ainda um ajuste por meio dos chamados fatores *alpha*, que atenuam os efeitos dos trens de pouso complexos no desgaste das estruturas de pavimento (Hayhoe, 2006).

Além do índice numérico, os outros fatores que compõem a classificação ACN/PCN são: o comportamento mecânico do pavimento, rígido (R) ou flexível (F); a categoria de resistência do subleito; a pressão de pneus permitida; e a forma de obtenção do índice numérico, por observação (U) ou técnico (T), como foi aqui descrito (ICAO, 1983).

2.3. ACR/PCR

Com a finalidade de atualizar o método de classificação de resistência de pavimentos aeroportuários, ainda em 2009, a ICAO estabeleceu um grupo de trabalho para o desenvolvimento de um índice de classificação que fosse compatível com os métodos de dimensionamento amplamente utilizados, e superasse as questões como os fatores *alpha* e de equivalência de materiais. No entanto, apenas em 2020 o conselho da ICAO aprovou a emenda 15, que estabeleceu a completa substituição do ACN/PCN pelo ACR/PCR a partir do ano de 2024 (ICAO, 2020).

O ACR/PCR mantém a simplicidade de apresentação do ACN/PCN, com o código sendo composto pelos mesmos fatores: índice numérico, tipo de pavimento, categoria de resistência do subleito, pressão de pneus e forma de obtenção do índice (ICAO, 2022).

O índice numérico é também obtido a partir da carga de roda simples equivalente, no entanto, o modelo de cálculo não utiliza o CBR, mas o método racional de análise linear elástica. A abordagem empírico-mecanística do novo método elimina a necessidade de fatores de equivalência e fatores *alpha* de ajuste (Fabre & Varus, 2019).

No entanto, para apresentar um índice numérico, direto e simplificado, o novo método também exige simplificações. Com respeito ao subleito, também são quatro as faixas de resistência, agora em termos do módulo de

resiliência, conforme Tabela 2 adaptada da FAA (2020).

Tabela 2: Faixas de resistência e seus valores de referência para o ACR/PCR.

Código	Resistência do subleito	E (Mpa)	
		Faixas	Referência
A	Alta	$E \geq 150$	200
B	Média	$100 \leq E < 150$	120
C	Baixa	$60 \leq E < 100$	80
D	Ultra baixa	$E \leq 100$	50

Da mesma forma como no ACN/PCN, no ACR/PCR cada aeronave tem quatro valores de ACR, um para cada resistência de referência. Esses ACRs são obtidos por meio do dimensionamento de estruturas padrão, com as aeronaves na condição de peso e arranjo de carga que gere máximos esforços no trem de pouso principal (ICAO, 2022).

O dimensionamento da estrutura padrão para o cálculo do ACR considera 36.500 operações das aeronaves. Diante da estrutura dimensionada, é obtida a carga de roda simples, com pressão de pneus de 1,50 Mpa, que cause a mesma deformação no topo do subleito em comparação com o trem de pouso de dimensionamento (ICAO, 2022).

O processo de obtenção do PCR é um pouco diferente do PCN, sendo escolhida a aeronave de maior contribuição para o CDF, de forma a representar a aeronave crítica. Faz-se o CDF causado por todo o *mix* ser representado pela aeronave crítica por meio do aumento da frequência. Em seguida, procede-se o aumento de carga dessa aeronave até que o dano acumulado seja de 100% (CDF=1,00). O PCR será então o ACR da aeronave crítica nesse último cenário de análise, onde o CDF=1,00. O processo deve ser refeito caso haja no *mix* aeronave com maior ACR (ICAO, 2022).

Um grande ganho em comparação com o método ACN/PCN é a forma como o ACR/PCR considera o dano acumulado. No método antigo, são computados os picos de tensão de cisalhamento, os quais são somados, independentemente da posição que a geometria do trem de pouso assume em relação ao eixo do pavimento (Fabre & Balay, 2013).

No novo método, a deformação promovida por cada uma das rodas do trem de pouso é considerada com os pontos de picos e zonas entre picos. Isso é considerado por meio da integração do dano elementar utilizado no ACN/PCN. Essa integração é repetida em alinhamentos paralelos, de forma a considerar o efeito do trem de pouso no sentido transversal (Fabre e Balay, 2013).

Outro ponto importante no método ACR/PCR, é que o dano computado por cada uma das aeronaves agora tem posição geométrica conhecida com relação ao eixo da pista. Assim, cada *offset* do eixo pode ter seu respectivo dano acumulado conhecido. Isso permite o uso mais eficiente da estrutura, uma vez que o *mix* de aeronaves possui diferentes geometrias de trens de pouso, que atuam em diferentes *offsets* laterais (Fabre & Balay, 2013).

3. MÉTODO

Foram realizados quatro estudos de caso, com pavimentos flexíveis nacionais e seus *mixes* de operação de aeronaves. Foram calculados os índices de PCN e PCR para cada uma das estruturas de pavimento, atendendo às diretrizes presentes nas circulares da FAA e aos manuais de cálculo de PCN e PCR da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Além da obtenção dos índices, foram comparados os CDFs dos dois índices ao final de cada processo de cálculo.

Os nomes dos aeródromos e suas localizações foram omitidos por solicitação da ANAC, que forneceu os dados das estruturas de pavimento e do tráfego.

A Tabela 3 mostra o tipo de área de circulação de cada estrutura estudada e sua condição na ocasião da obtenção dos dados.

Na Tabela 4, são apresentadas as estruturas de pavimento objeto dos estudos de caso com os tipos de materiais, suas espessuras, coeficientes de Poisson e módulo de resiliência.

Tabela 3: Estudos de caso.

Estudo de caso	Área	Status
1	Pista de PPD	Existente
2	Extensão de PPD	Projetada
3	Extensão de PPD	Projetada
4	Pista de taxi	Existente

.

Tabela 4: Estruturas de pavimento.

	Camada	Espessura (cm)	Poisson	Módulo (Mpa)
1	Revestimento asfáltico	30,00	0,30	1.500,00
	Brita graduada simples	40,00	0,35	250,00
	Subleito (CBR = 14%)	-	0,40	145,00
2	(P-401)	9,91	0,35	1.378,95
	(P-304)	17,02	0,20	3.447,38
	(P-209)	14,99	0,35	458,86
	Subleito (CBR = 20%)	-	0,35	206,84
3	(P-401)	10,00	0,35	1.378,95
	(P-403)	12,70	0,35	2.757,90
	(P-209)	31,11	0,35	418,24
	Subleito (CBR = 13%)	-	0,35	134,45
4	(P-401)	10,60	0,35	1.378,95
	(P-209)	15,00	0,35	397,54
	(P-154)	25,00	0,35	169,94
	Subleito (CBR = 15,2%)	-	0,35	157,20

Para o cálculo do PCN, foi utilizado o programa COMFAA 3.0 da FAA. Uma vez que o método PCN exige a conversão dos materiais para a utilização da estrutura tipo na rotina de cálculo, cada uma das estruturas foi convertida na estrutura tipo por meio da planilha de apoio ao COMFAA 3.0, da própria FAA

Essa estrutura tipo é composta por revestimento asfáltico do tipo P-401, base granular do tipo P-209 e sub-base granular do tipo P-154. Todos os quatro *mixes* de aeronaves possuíam ao menos uma aeronave com mais de duas rodas na metade de seu trem de pouso principal. Por esse motivo, a estrutura tipo de conversão foi definida com 127,0 mm de revestimento e 203,2 mm de base granular. O excesso dessas espessuras ou a compensação pelo seu déficit é sempre realizada pelo aumento ou diminuição da sub-base, sempre de acordo com os fatores de equivalência de materiais.

O procedimento de cálculo do PCN recomenda que, no caso de obtenção do CDF menor do que 0,15, deve-se realizar algumas alterações na relação passagem/ciclo de tráfego (P/TC). Caso isso não seja suficiente para levar o CDF ao menos até 0,15, deve-se ajustar também o tráfego. Em último caso, o PCN e seu CDF são calculados para estruturas fictícias, originadas da redução de resistência do subleito e redução de camadas do pavimento, iniciando da camada logo acima do subleito, até que o CDF atinja o valor de 0,15.

Esse procedimento foi necessário nos três primeiros estudos de caso. Assim, apenas o estudo de caso quatro obteve os valores de PCN e seu CDF com estrutura e tráfego originais.

O cálculo do índice PCR foi realizado utilizando o programa FAARFIELD 2.0.7, da FAA. Apesar de ter também uma estrutura tipo para o cálculo composta por revestimento asfáltico e base granular, o método PCR não necessita da conversão dos materiais da estrutura de análise. A estrutura existente é equiparada à estrutura tipo por meio da comparação das tensões e deformações dessas, ajustando-se à espessura de base granular.

O cálculo do PCR é realizado por meio da análise linear elástica utilizando as características mecânicas de cada camada do pavimento. Nos estudos de caso 2 e 3, os dados foram obtidos do projeto dessas estruturas.

Nos estudos de caso 1 e 4, as características dos materiais foram obtidas de levantamentos deflectométricos. No primeiro, o relatório apontou os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson de cada camada, e no quarto, comenta que os módulos se aproximam dos padrões de especificação da FAA. Assim, para o estudo de caso 1 foram utilizados os módulos de elasticidade retroanalisados e os coeficientes de Poisson que o FAARFIELD utiliza, 0,35 para materiais asfálticos e granulares. O estudo de caso 4 utilizou os módulos dos materiais padrão FAA e também os coeficientes de Poisson conforme FAARFIELD, neste caso, 0,20 para a base cimentada.

Todos os relatórios definem a resistência do subleito em termos do CBR. Dessa forma, o módulo de resiliência (MR) do subleito foi obtido por meio da Equação 1, utilizada pela FAA no programa FAARFIELD.

$$MR = CBR \times 10{,}34$$

Equação 1: Relação MR x CBR.

No método PCR, ao se obter CDFs muito baixos, zero ou próximos de zero, e assim, valores de PCR muito altos, a recomendação é adotar como valor de PCR o maior ACR presente no *mix*, acrescido de 25%. Isso ocorreu nos estudos de caso 1 e 3.

Os dados de CDF de cada um dos métodos foram avaliados e comparados com a finalidade de verificar qual deles é mais restritivo e se haverá necessidade de restringir peso ou

frequência de alguma aeronave para os casos em tela.

4. RESULTADOS

A análise dos quatro estudos de caso não mostrou a necessidade de restrição de carregamento ou operações. A Tabela 5 apresenta as etapas realizadas para a obtenção dos dois índices e dos seus fatores de dano acumulado.

Nos quatro estudos de caso realizados os pavimentos se mostraram superdimensionados para o tráfego previsto, para os vinte anos de operação. Todos eles apresentaram CDF inferior a 1,0, tanto pelo método ACN/PCN, como pelo método ACR/PCR.

Para o estudo de caso 1, em ambos os casos, o CDF do pavimento resultou em zero. Para obter o índice de PCN, foi necessário reduzir a resistência do subleito e a espessura da camada de base, de 400mm para 155mm, resultando em um CDF de 0,1659. O PCR foi obtido pelo valor do maior ACR do *mix*, multiplicado por 1,25.

A estrutura virtual, utilizada para o cálculo do PCN final do estudo de caso 1, foi analisada sob a metodologia do PCR. O CDF obtido (21,1320) mostrou que, embora a estrutura fictícia tenha sido adequada ao tráfego do *mix*, à luz do índice PCN, com CDF de 0,1659, quando analisada pelo PCR, resulta em uma vida de serviço de menos de um ano, como mostra a Tabela 6.

Tabela 5: Etapas realizadas para o cálculo dos índices de PCN e PCR, com seus CDFs.

ESTUDO DE CASO	PCN						PCR						
	RELAÇÃO P/TC	TRÁFEGO	ESTRUTURA CBR (mm)	CBR	CDF	VALOR (PCN)	RELAÇÃO P/TC	TRÁFEGO	ESTRUTURA	CBR	CDF	VALOR (PCR)	CORREÇÃO (PCR)
1	1	Original	Original (993,2)	14	0,0000	-	1	Original	Original	14	0,0000	1045	852
	10	Original	Original (993,2)	14	0,0000	-							
	10	X 10	Original (993,2)	14	0,0000	-							
	10	Máxima	Original (993,2)	14	0,0000	-							
	1	Original	Original (993,2)	13	0,0000	-							
	1	Original	redução de 100mm de P-209 (853,2)	13	0,0000	-							
	1	Original	redução de 200mm de P-209 (713,2)	13	0,0045	-							
	1	Original	redução de 260mm de P-209 (629,2)	13	0,4496	-							
	1	Original	redução de 230mm de P-209 (671,2)	13	0,0543	-							
	1	Original	redução de 240mm de P-209 (657,2)	13	0,1157	-							
	1	Original	redução de 245mm de P-209 (650,2)	13	0,1659	76,3	1	Original	redução de 245mm de P-209	13	21,1320	481,1	-
2	1	Original	Original (480,8)	20	0,0221	-	1	Original	Original	20	0,0040	1485,3	850,75
	6,8	Original	Original (480,8)	20	0,1501	79,7	6,8	Original	Original	20	2,5130	640,1	-
3	1	Original	Original (705,3)	13	0,0014	-	1	Original	Original	13	0,6630	608,5	-
	10	Original	Original (705,3)	13	0,0136	-							
	10	X 10	Original (705,3)	13	0,1359	-							
	1	X 100	Original (705,3)	13	0,1359	-							
	1,15	X 100	Original (705,3)	13	0,1563	61,4	1,15	x 100	Original	13	66,3430	484,5	-
4	1	Original	Original (458,7)	15,2	0,8839	45,2	1	Original	Original	15,2	0,7740	417,6	-

Tabela 6: Resumos de CDF e vida de serviço para os diferentes cenários.

Estudo de caso	PCN				PCR			
	Primeira análise		Última análise		Primeira análise		Última análise	
	CDF	Vida útil	CDF	Vida útil	CDF	Vida útil	CDF	Vida útil
1	0,0000	Infinito	0,1659	120,55	0,0000	Infinito	21,1320	0,95
2	0,0221	904,98	0,1501	133,24	0,0040	5000,00	2,5130	7,96
3	0,0014	14285,71	0,1563	127,96	0,6630	30,17	66,3430	0,30
4	0,8839	22,63	-	-	0,7740	25,84	-	-

O estudo de caso 2 resultou na obtenção de um CDF maior que zero, porém bastante abaixo de 0,15 para ambos os métodos. Assim, como prevê o método PCN, a relação P/TC foi ajustada para 6,8, de forma a obter o CDF mais próximo de 0,15. Essa mesma relação P/TC foi utilizada para analisar o comportamento do CDF pelo método PCR. Com a nova relação P/TC, utilizada no método PCR, o pavimento não estaria adequado ao tráfego da análise, resultando em uma vida de serviço de pouco menos de oito anos, como mostrado na Tabela 6.

O CDF do terceiro estudo de caso teve também seu tráfego ajustado para o método PCN, chegando na última análise com uma relação P/TC de 1,15 e seu tráfego multiplicado por 100. Essa configuração de solicitações de tráfego gerou um CDF final de 0,1563. O PCR do terceiro estudo de caso obteve CDF adequado na primeira análise, com o valor 0,15<0,663<1,00. No entanto, o tráfego ajustado à última análise de PCN foi utilizado no PCR para verificar o comportamento de seu CDF, que passou ao valor de 66,3430, gerando uma vida de serviço de menos de um ano.

Para o quarto e último estudo de caso não foi necessário ajuste algum, de estrutura ou de tráfego. O PCN obteve CDF de 0,8839, enquanto o CDF do PCR foi de 0,7740.

Os índices de PCN e PCR para cada um dos estudos de caso constam na Tabela 7.

Tabela 7: Índices de resistência finais.

Estudo de caso	PCN	PCR
1	76/F/A/X/T	852/F/B/X/T
2	80/F/A/X/T	851/F/A/X/T
3	61/F/A/X/T	609/F/B/X/T
4	45/F/A/X/T	418/F/A/X/T

A classificação das resistências dos subleitos dos quatro estudos de caso estão agrupados na Tabela 7, junto com seus outros parâmetros. Nota-se que os estudos de caso 1 e 3 tiveram as classificações de resistência do subleito diferentes de um método para o outro. Isso ilustra a incompatibilidade entre as faixas de resistência de subleito presente nos dois métodos.

É intrínseco a ambos os métodos o aumento dos valores de ACN e ACR à medida que a resistência do subleito diminui. Assim, é possível que o desencontro entre faixas de resistência de subleito seja responsável por permitir cargas maiores no método ACR/PCR, apenas pela diminuição da categoria de resistência em que o subleito é classificado.

5. CONCLUSÕES

O trabalho analisou quatro pavimentos flexíveis aeroportuários, calculando seus índices de PCN e PCR. Em nenhum dos cenários a estrutura do pavimento original foi insuficiente à utilização pelo tráfego previsto.

Nos estudos de caso 1, 2 e 3, o cálculo do PCN exigiu ajuste do tráfego e/ou da estrutura para que o CDF da análise atingisse valores próximos a 0,15. Isso significa que as estruturas estão superdimensionadas para os tráfegos em questão. Desses estudos de caso, com respeito ao PCR, apenas o primeiro e o segundo também apresentaram tal excesso de dimensionamento da estrutura.

Ajustados esses três casos a um CDF de 0,15, para o método PCN, e replicadas essas condições de contorno para o cálculo do PCR, verificou-se que por meio do último método, o pavimento apresenta um desgaste acelerado. Isso significa que, se as estruturas de pavimento e os tráfegos fossem utilizados aos moldes da última análise do PCN, esse índice estaria adequado e

com CDF próximo de 0,15, enquanto o índice PCR deveria sofrer uma análise para restrição de carregamentos e/ou frequências de operação.

Chama a atenção o estudo de caso 2, no qual a primeira análise tem como índice de maior CDF o PCN, 0,0221, comparado à 0,0040 do PCR, relação que se inverte com o aumento da relação P/TC.

O estudo de caso 4 não necessitou de ajustes da estrutura ou do tráfego para o cálculo do PCN, resultando em um CDF abaixo, mas próximo de 1,00. O índice de PCR obteve um CDF próximo ao CDF do PCN.

Observa-se então, os mais diferentes comportamentos pela comparação dos dois índices de resistência para as estruturas de pavimento em questão:

- PCN e PCR com baixíssimo dano acumulado na primeira análise (estudos de caso 1 e 2);
- PCN com maior dano acumulado que o PCR (primeira análise do estudo de caso 2 e estudo de caso 4); e
- PCR com maior dano acumulado que o PCN (últimas análises dos estudos de caso 1, 2 e 3, utilizando tráfego modificado ou estrutura fictícia).

Acrescenta-se a esses fatos a incompatibilidade entre faixas de resistência do subleito, que pode influenciar na permissão de maiores carregamentos pela alteração na classificação da faixa de resistência.

Conclui-se que não é possível afirmar que o novo método de classificação de resistência de pavimentos aeroportuários, o ACR/PCR, será mais ou menos restritivo em termos de cargas ou frequências em comparação com o atual (ACN/PCN). No entanto, foi verificado que em todos os estudos de caso, a estrutura do pavimento existente era suficiente para comportar o tráfego do *mix*, com folga, para os dois métodos. Assim, mesmo havendo diferenças entre os métodos, muitos pavimentos aeroportuários podem vir a ser reclassificados sem que haja alteração na admissibilidade de frequências e cargas.

Referências

FAA. (2014). *Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness*. Advisor Circular 150/5335-5C.

FAA. (2020). *Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCR*. Advisor Circular 150/5335-5D.

FABRE.C, Varus.G. (2019). *Paradox: Why the Heaviest Commercial Airplane Remains the Most Pavement Friendly Aircraft at Large Hub Airports*. Airfield and highway pavements.

FABRE, C e BALAY, J M. (2013). *Toward a new ICAO Aircraft Classification Number (ACN) methodology*. Proceedings of the international conferences on the bearing capacity of roads, railways and airfields.

HAYHOE, G. (2006). *Alpha Factor Determination Using Data Collected at the National Airport Pavement Test Facility*.Thecnical Report.

ICAO. (2020). *Aerodromes - Aerodrome Design and Operations*. International Civil Aviation Organization.

ICAO. Doc 9157 (1983). *Aerodrome Design Manual*. Part 3.

ICAO. Doc 9157 (2022) *Aerodrome Design Manual*. Part 3.

LOIZOS, A. e CHARONITIS, G. (2004). *Bearing capacity and structural classification of flexible airport pavements*. Journal of Transportation Engineering, v. 130, n. 1, p. 34–42.

LOIZOS, Andreas e CHARONITIS, George e CHASIOTOU, Ioanna. (2000). *Classification of airport pavements: A simple methodology*. Public Works Management & Policy, v. 5, n. 2, p. 115–125.

BLOCKCHAIN-BASED TRAFFIC MANAGEMENT FOR ADVANCED AIR MOBILITY

Ítalo Romani de Oliveira, Thiago Matsumoto
Boeing Research & Technology Brazil

Euclides Carlos Pinto Neto
IEEE Member

*** Corresponding author e-mail address**: italo.romanideoliveira@boeing.com

PAPER ID: SIT132

ABSTRACT

The large public interest in Advanced Air Mobility (AAM) will soon lead to congested skies overhead cities, analogously to what happened with other transportation means, including commercial aviation. In the latter case, the combination of large distances and demanded number of flights is such that a system with centralized control, with most of the traffic control decisions made by human operators, is safe. However, for AAM, it is expected a much higher demand for flights, because it will be used for people's daily commutes. Thus, higher automation levels will become a requirement for coordinating this traffic, because of its higher complexity, which might not be effectively managed by humans. The establishment of fixed air routes can abate complexity, however at the cost of limiting traffic capacity and decreasing flight efficiency. Another alternative is the use of a powerful central system based on Artificial Intelligence (AI) and / or other advanced algorithms, which would allow flexible trajectories and higher efficiency. However, such system would require concentrated investment, could contain Single-Points-of-Failure (SPoFs), would be a highly sought target of malicious attacks, and would be subject to periods of unavailability.

This work proposes a new technology that solves the problem of managing the high complexity of the AAM traffic with a secure distributed approach, without the need for a proprietary centralized automation system. This technology enables distributed airspace allocation management and conflict resolution by means of trusted shared data structures and associated smart contracts running on a blockchain ecosystem. This way, it greatly reduces the risk of system outages due to SPoFs, by allowing peer-to-peer conflict resolution, and being more resilient to failures in the ground communication infrastructure. Furthermore, it provides priority-based balancing mechanisms that help to regulate fairness among participants in the utilization of the airspace.

Keywords: Advanced Air Mobility (AAM), Blockchain, Smart Contracts, Resiliency, Geolocalization.

1. INTRODUCTION

1.1. ADVANCED AIR MOBILITY

Advanced Air Mobility (AAM) is an air transportation system concept that makes intensive use of disruptively new aircraft designs and flight technologies in order to enable alternative ways of moving goods and people in shorter times and more conveniently. It involves the so-called Urban Air Mobility (UAM), which uses highly automated aircraft operating the transport of passengers or cargo at lower altitudes within urban and suburban areas, and extended application cases, such as (FAA, 2022):

- Innovative Inter-city transportation;
- Public services;
- Private and Recreational uses.

1.2. TRAFFIC MANAGEMENT IN AAM

As AAM becomes more usual and popular, high volumes of traffic of the new air vehicles will arise. Currently there is no operating solution for high-capacity AAM traffic, despite the existence of several published Concept of Operations documents (FAA, 2020; EmbraerX; Atech; Harris, 2020; UK Air Mobility Consortium, 2022). These documents claim that the use of airspace structures in this environment can provide safety and efficiency benefits and therefore should be one of the fundaments in place. However, the obligation to follow circulation corridors and/or to be restricted to small cells of airspace decrease the efficiency of individual flights by requiring longer routes. This efficiency loss may be compensated by the benefits of avoiding gridlocks and chaotic traffic, but fixed corridors also create new bottlenecks. By the use of airspace structures, one is giving away efficiency and capacity in order to decrease complexity and increase predictability (Sunil, et al., 2016; Bauranov & Rakas, 2021).

On the other hand, it is possible to think of an airspace environment where trajectories are completely free and each aircraft keeps separation from others by its own means, which may not be safe when there are several aircraft close to each other, as demonstrated in (Romani de Oliveira, et al., 2021). The patent document (United States Patente Nº US10332405B2, 2014) describes a technical solution for a high traffic density of air vehicles, where each vehicle performs its own separation completely independently, without mechanisms to enable collaborative traffic management and reward fair use of the airspace. In spite of that, that solution still requires some centralized entities to provide authentication and maintain geo-fencing and spatial-fencing databases, which, in the absence of redundancy schemes, constitute Single-Points-of-Failure (SPoFs).

The papers (Romani de Oliveira, Matsumoto, Pinto Neto, & Yu, 2021; Romani de Oliveira, et al., 2021) present an in-depth comparison between centralized, de-centralized and collaborative traffic solutions, identifying the strengths and weaknesses of each one. The centralized solution is the most efficient and safe one in high-density scenarios, however has SPoFs by definition and requires a long-term fairness mechanism; the fully decentralized solution is robust and fair among equals but is inefficient and less safe in high density scenarios; and the collaborative solution brings a balance of these two opposite solutions, including the property that it is free of deadlocks, to which the strictly decentralized solution is not foolproof.

For a more comprehensive review of different airspace designs for AAM, considering various aspects as interaction with the city and society, one can refer to (Bauranov & Rakas, 2021).

1.3. BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

Recurring to a known analogy, the Internet was developed exactly to make network communications more robust. Nobody controls the Internet, and it is extremely hard to bring it down in large scale, because each cluster of nodes is completely autonomous. This was intentional since the beginning, because one of the most important drivers in its creation was to survive to nuclear attacks. The decentralization principle of the Internet was so successful in transforming our lives that it enabled many associated collaborative tools of work and leisure, such as the wikis, social media, Git and many others. The novel Air Traffic Management solution proposed in this paper has a similar

decentralization principle as that of the Internet, with the goal of achieving robustness and resiliency.

In the realm of online transactions and contracts management, the decentralization principle gave rise to the so-called Distributed Ledger Technology (DLT), which has the goal of ensuring validity of data blocks shared among many users without the need of a trusted third party. These data blocks can be used for transactions, data storage or for any other computational operation, shared among users that do not necessarily trust each other, with arbitrarily high levels of data integrity. A Blockchain is a type of DLT in which all validated data blocks are stored in a single line of time, each block referencing its predecessor and validated by a hash field, as illustrated in Figure 1.

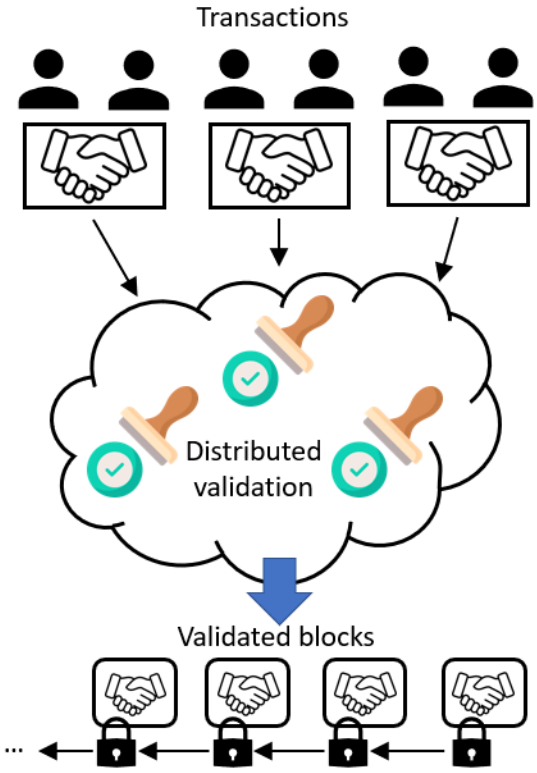


Figure 1: the Blockchain concept.

Blockchains became highly popular because they have the goal not only of being decentralized financial systems, but many of them are being used, appropriately or not, as means of wealth accumulation. The usefulness of Blockchain to the technical solution proposed here lies on various of its features: data integrity, irrefutability and the possibility of running complex logic inside it, that is, entire programs, also known as Smart Contracts. The consistency of these features is still evolving (Sultanik, et al., 2022), as a high degree of decentralization is difficult to attain in all aspects of the implementation, however we assume that a reliable blockchain solution will be available, being it either one of those existing today, or a new one to be developed.

As it will be shown in the next sections, complex logic is needed to be run inside the blockchain, in order to make collaborative or adversarial decisions with unambiguous and unescapable rules in the context of airspace allocation and conflict management.

2. THE PROPOSED SOLUTION FOR DISTRIBUTED AIR TRAFFIC MANAGEMENT

The main objectives of the solution here proposed is to provide high-capacity, reliable and safe automation for air traffic management, without the need for a trusted central authority that maintains complex software, infrastructure, and human operators. This section describes rules and logic that will run on a Blockchain to achieve those objectives, and some additional elements that are needed outside the Blockchain in order to complete the solution. For brevity, in the remainder of the paper we refer to this technical solution simply as “this system” or “system”.

Here we describe the use case of a commercial or private air vehicle operator, but this use case system can be adapted to all types of airspace users, including public services operation such as medical, law enforcement, military, etc. The overall use-case logic of a flight is illustrated in **Figure 2** and explained in the next sections.

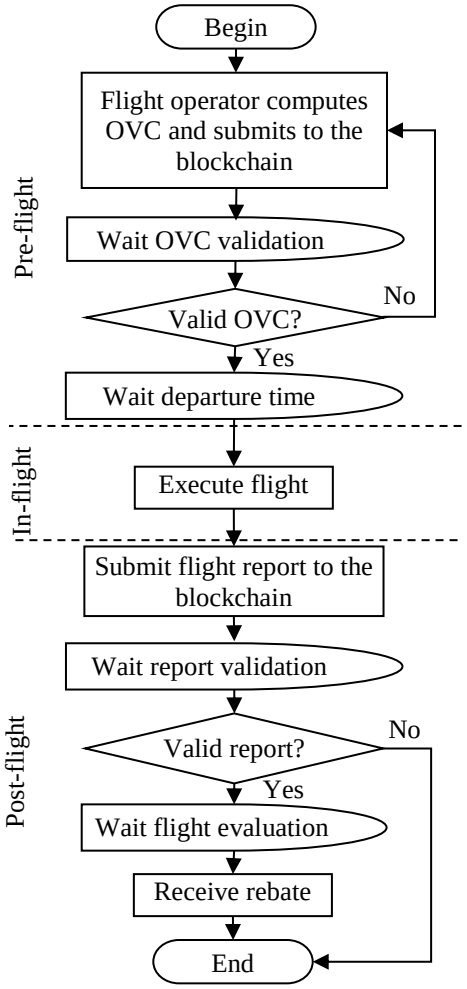


Figure 2: typical use case of a commercial or private flight operator

2.1. PRE-FLIGHT OPERATIONS

Let us consider the case of a vehicle operator O_A, which wants to fly from location L_{A^0} to L_{A^1}. In order to deconflict its trajectory from others, the vehicle operator will compute the 4-dimensional volume which contains her vehicle's trajectory and additional safety buffers. This volume is named here Operating Volume Contract, or simply OVC (Hsieh, Sbai, Taylor, & Mitra, 2021). This OVC, here distinguished as OVC_A, will be thrown in the blockchain thread of unverified OVCs, and a token value will be deposited together with the tentative OVC as for maintenance of the blockchain and insurance for the case of not fulfilling the OVC. Another entity connected to this distributed system, here named D_n $(n = 1, \dots, N)$, will search for conflicts between OVC_A and other OVCs previously existing in the blockchain. If D_n finds no conflicts with OVC_A, it will proceed to find the computational puzzle typical of a blockchain and provide a valid block, with corresponding hash value, which endorses OVC_A. This block may contain either only OVC_A or bundle it with other verified OVCs. An abstract illustration of this idea is shown in **Figure 3**.

Any node in the blockchain (except the one to which O_A is connected, by definition) might broadcast a validated block for OVC_A, without actually verifying its airspace safety. In order to prevent the bad consequences of this event, if any other node, let us name it as D_m, further finds a conflict with the already validated OVC_A, it will no longer forward the incorrect block, and generate a new block with a conflict demonstration, in a separate thread of the blockchain, the so-called conflict demonstration thread.

After some time elapsed, a consensus among the blockchain nodes is attained, and the corresponding block B_k is accepted and stably incorporated to the blockchain. This happens in either the case of demonstrated conflict, or the case of absence of conflict. Part of the deposit initially made by O_A, in the issuance of $\mathrm{OVC_A}$, will be transferred to the owner of the node which first generated B_k, as a transaction fee to cover computation and networking costs. This incentive scheme works either if all nodes are equally verifying conflicts, analogously to the Proof-of-Work blockchain scheme (a.k.a. PoW) (Wikipedia, 2022a), and only the first to generate B_k gets rewarded; or, alternatively, a small number of nodes is selected to endorse or counter-proof the solicited OVC, analogously to the Proof-of-Stake blockchain scheme (a.k.a. PoS) (Wikipedia, 2022b), and all of them get a reward. The latter case has been demonstrating to be economically and environmentally more sustainable (Investopedia, 2022).

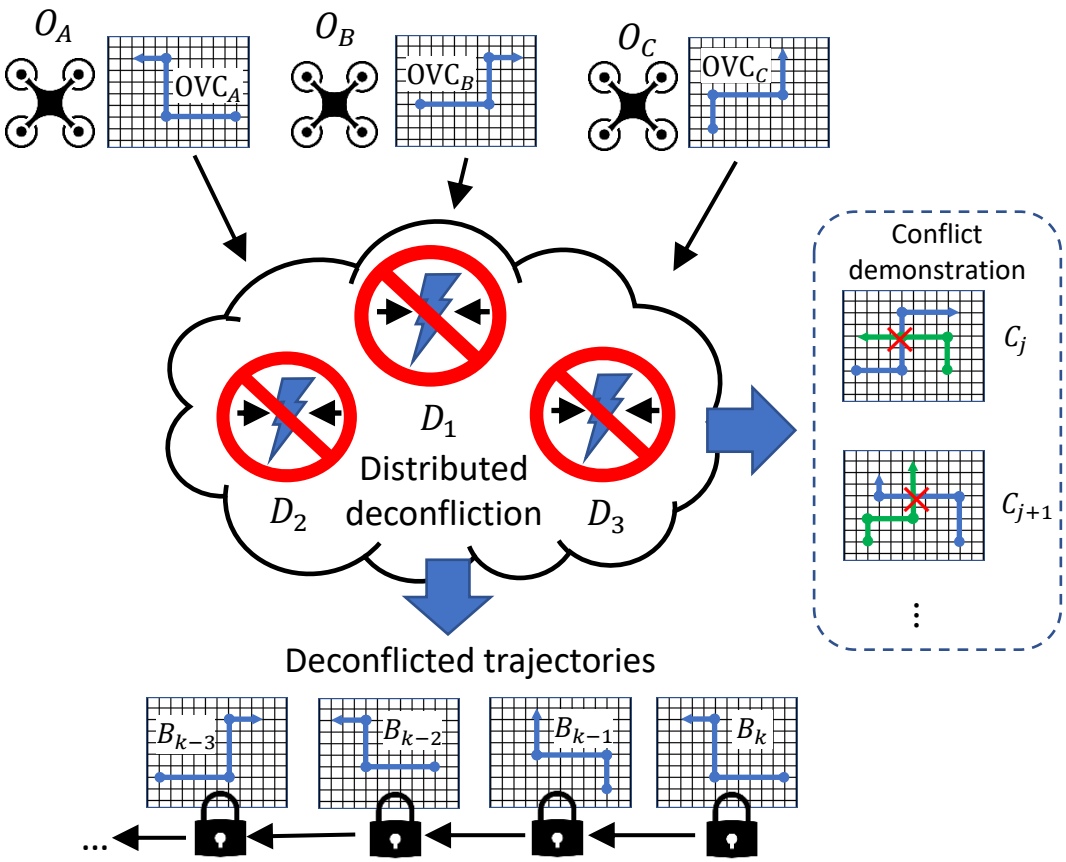


Figure 3: Blockchain-based validation of Operation Volume Contracts (OVC).

So, at any given moment, the blockchain thread of the planned OVCs would contain a number of OVCs planned by the various vehicle operators, with a guarantee that these OVCs do not interfere with each other and, at least in the planning context, the vehicles are safely separated from each other. The blockchain consensus scheme prevents that fraudulent users or operators disseminate OVCs that have not been validated by the consensus algorithm, unless one succeeds in performing the so-called 51% attack, which is practically impossible with the correct blockchain definitions and implementations.

This system can accommodate flights without a pre-defined trajectory, as it may happen for media coverage of events, certain types of observation flights, leisure flights, etc. In these cases, the operator requests a low-priority, non-exclusive OVC, which might be quite extensive. This volume is flagged as non-exclusive and is verified by other blockchain nodes, which check if the sum of simultaneous users of that portion of airspace does not exceed a certain limit (a capacity verification). The requested volume might include exclusive OVCs, for simplifying computations of 4D airspace volumes, however in that case the low-priority requesting user must not enter the exclusive OVC when it is actually in use.

The distribution and acquisition of token values to the users is out of the scope of the present paper, however, it might be controlled by the airspace authority, thus guaranteeing its authority role. The airspace authority may have the power to generate transactions to credit and withdraw token amounts from operators and participating nodes based on access rights and compliance to the rules of safe airspace use (e.g. to charge fines, etc.). However, most of the token transactions should be designed to incentivize efficient use of the airspace and fund the maintenance and technological progress of this system.

2.2. IN-FLIGHT OPERATIONS

Predictability is a strong support to flight efficiency. Thus, this solution allows mechanisms to incentivize predictability. On the

one hand, air vehicle operations are subject to many uncertainty factors and should not be stifled by unreasonable requirements of predictability. One of the most important attractions of AAM is flexibility, which is enabled by this system, but in balance with predictability and safety. This is achieved by making that operators to recover part of the token amount that they deposited to issue a new flight, depending on an "assiduity" or "compliance" measure, which will evaluate how much the actual flight complies with the planned flight. This fundamental idea seems simple but, in practice, requires treatment of exception cases.
There are factors that are uncontrollable and/or unforeseeable by the flight operator, that may compromise a flight's compliance. For example, a vehicle is struck by a bird while in flight, having to do an emergency flight termination. While this is a rare occurrence, this case should not be regarded as a lack of assiduity to the OVC. But other more common occurrences are analogous, such as giving priority to a public service vehicle, with higher priority, or deviating from a blunder vehicle. Thus, after a flight terminates, the operator will issue a report of the flight, which will be the key for defining how much she will recover from the pre-flight deposit.

If an airspace conflict is detected while in flight, this system has definitions that help solving the conflict in a fair and efficient manner. Conflicts have three different categories:

1. Vehicles of different priority levels are involved in an encounter;
2. Some of the vehicles is out of its OVC;
3. Two or more vehicles with non-exclusive OVC are involved in an encounter.

In the first case, the vehicle with lower priority has to perform a deviation maneuver, while the vehicle with higher priority should not deviate. For example, a commercial vehicle has to deviate from a public service vehicle; or a vehicle with non-exclusive OVC has to deviate from a vehicle possessing an OVC and adhering to it.

In a second case, a vehicle requested an OVC (exclusive or non-exclusive) and is not adhering to it. In this case, it receives the lowest priority level and has to perform the deviation maneuvers from vehicles that are adhering to the OVC.

In the third case, the vehicles are in the same priority level, and a tiebreaker criterion is used, which is to compare the numeric value of hash obtained in the approval of its OVC. This criterion is also used in other cases where the vehicles are in the same priority level (for example, when both vehicles are deviating from the OVC).

This priority hierarchy is a fundamental aspect of this system, since it guarantees that conflicts are solved in realistically feasible amounts of time, a feature whose importance grows with the number of vehicles involved in a conflict: an aircraft has to perform a maneuver that takes into account only the other aircraft with lower priority; and avoids certain situations where repeated maneuvers could continue indefinitely (timeout situations).

It is important to highlight that this concept of operations does not require that blockchain transactions are completed during a flight, thus flight critical decisions do not depend on the blockchain transaction latency. Instead, immutable blockchain blocks can be retrieved for some of the decisions, and the air vehicle itself can broadcast locally the relevant information from the Blockchain that is critical for other vehicles' flight-critical decisions.

2.3. POST-FLIGHT OPERATIONS

A flight report consists of a series of 4-dimensional points and, if deviations from the OVC occurred, justifications may be included. The report has to wait out a challenge period in order to obtain validation, according to Figure 4.

Any node in the network can initiate a challenge to this report and, in order to do that, has to deposit a token amount equal to that deposited by the issuer of the report. Once the challenge is initiated, it has a period to gather a committee with a minimum number of voters (e.g., 3); if not enough voters are gathered, the amount deposited by the challenger party will be returned to itself. On the contrary, if there are enough voters, the reward outcome would be as following.

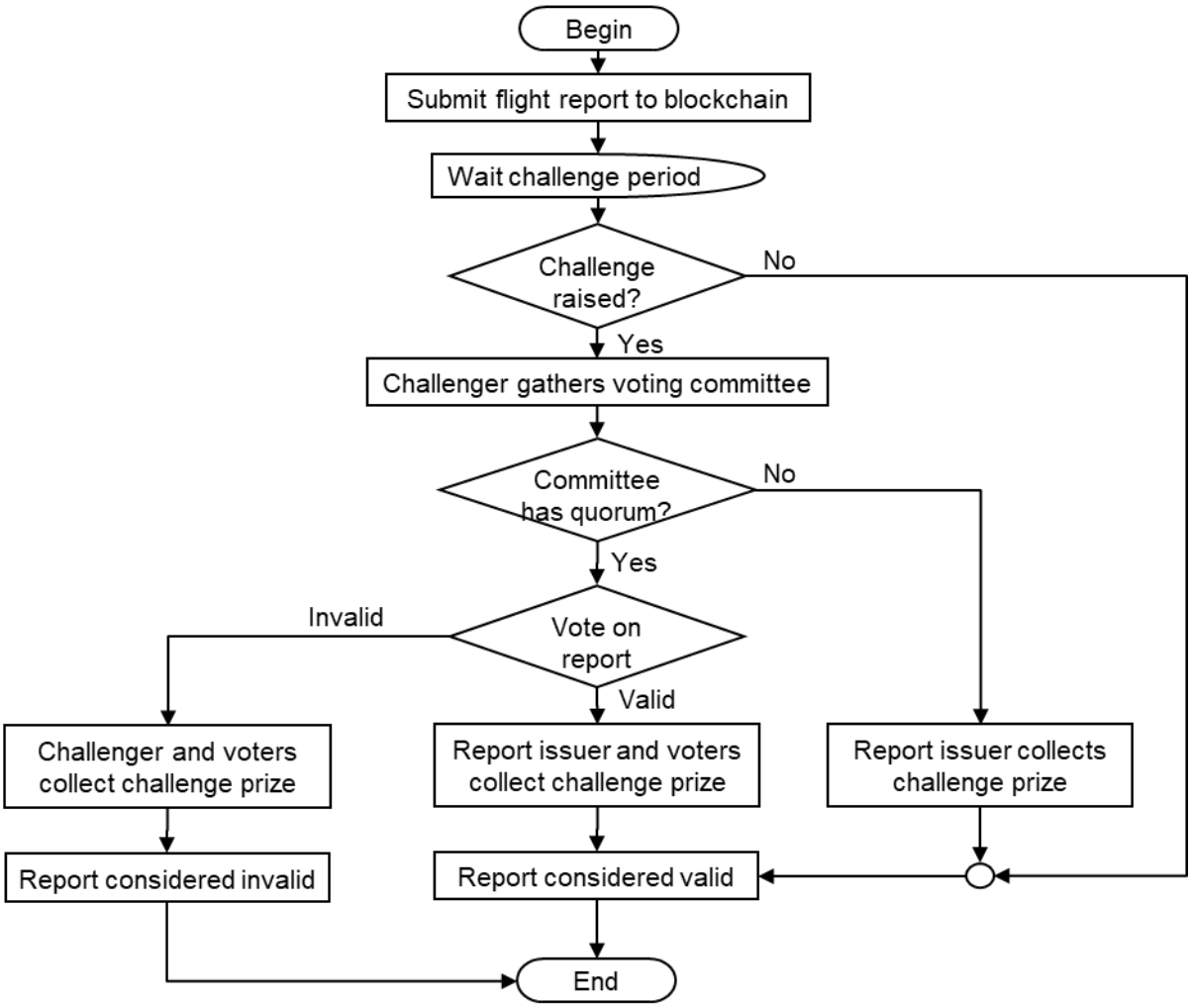


Figure 4: flight report validation process.

If the challenging party wins, it will recover its deposit, and divide the amount deposited by the report issuer, after deducing other transaction fees, with the other voters. Otherwise, the challenging party will divide the amount deposited by the challenger with the other voters. This incentive scheme is aimed at promoting participation and truthfulness in a consensus-based verification of the fulfilment of the flight OVCs.

If no challenges to a report is issued during the challenging period, or if the report wins the challenges, it is incorporated as a valid report to the blockchain, and another consensus protocol is employed to provide its evaluation measure. In the case that the report is refused, there might be still a playoff request with a revised report. The evaluation measure calculation method must be uniform and universally accepted, and the consensus protocol should eliminate erroneous calculations and choose the prevalent value, as opposing to calculate a mean value. As in other consensus decisions, it may be either be via PoW or PoS, with corresponding distribution of transaction fees for the participating nodes, from the value deposited by the report issuer. The balance remaining from this deposit, after the various transaction fees, will be the base value to calculate its rebate. Good flight compliance evaluation measures will result in high rebates, while bad flight compliance evaluation measures fill result in low rebates. The balance that remains after all fees and rebates, from the initial deposit by the flight issuer, after all expiration deadlines, returns to the airspace authority, which will choose to redistribute it according to its policies of incentives and taxation.

2.4. PHYSICALLY TRACKING AIRCRAFT'S POSITIONS

Using records of GNSS signals would not be a reliable solution for checking aircraft's positions during or after the flight, since these signals can be spoofed (artificially generated). However, physical verification of vehicle location can still be achieved by independent agents in various manners, among which by means of radio triangulation / multilateration, as illustrated by Figure 5.

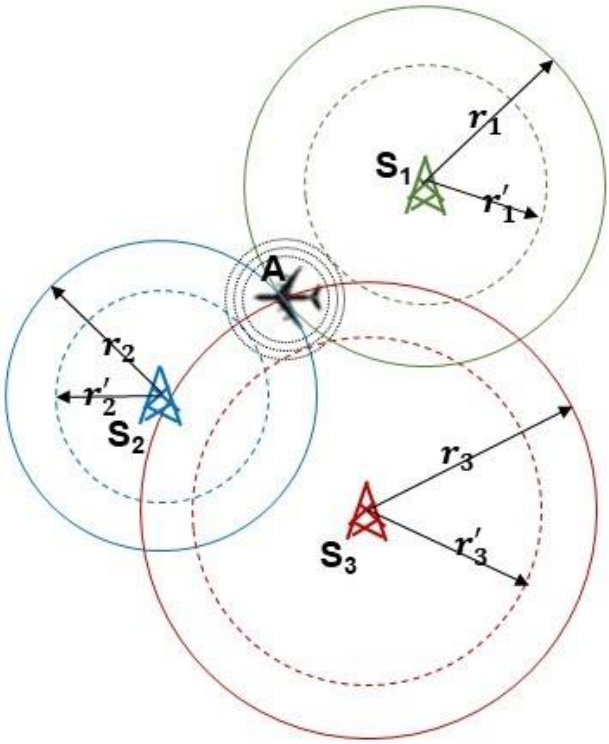


Figure 5: Multilateration of an aircraft's position via radio stations (source: Wikipedia).

Multilateration uses a principle that mirrors that of the Global Navigation Satellite System (GNSS), with position calculation performed outside the vehicle and belonging to the system composed by the external sensor stations (S_1,…,S_n). These stations may be fixed on ground, on satellites or even be dynamically composed by peer vehicles. Apart from that, assuming that every aircraft can use a 4G or 5G cellular device, a report from the cellular telecom provider may be used for multilateration and attest vehicles' positions, however this might put too much power in the hands of the telecom provider, and incentivize it to collude with certain vehicle operators. Thus, in this solution the aircraft must be equipped with a radio device to broadcast an encoded message with its identity code, at least, in a non-directional signal, similarly to what is done with ADS-B for commercial and general aviation. This device can work in any frequency and modulation scheme that is appropriate to a low power consumption. Determining the spatial position (latitude, longitude, altitude) of an aircraft requires at least four passive stations, if the stations are synchronized, or six passive stations if they are not synchronized (Stefanski & Sadowski, 2018). If the aircraft transmits its altitude (measured by its own means), and this parameter is used as calculation input, one of these stations is no longer required. However, this system must be robust to erroneous or false altitudes reported by the aircraft (e.g. uncalibrated or faulty sensors), thus four or more stations are needed to determine an aircraft's position for each broadcast message transmitted. If fixed ground stations are used, it is expected that most of the stations in the vicinity of an aircraft will be positioned at similar altitudes, thus the accuracy of the altitude calculation via multilateration will not be very good with 4 stations only. However, by using filtering and machine learning methods, it is possible to gather data from an arbitrary number of stations and increase the accuracy of the position determination. Video processing techniques can also be used to help altitude and position determination. Satellite-based multilateration

might be advantageous in altitude determination, although the ionospheric weather causes variability in the signal quality and, consequently, in the accuracy of position determination. This type of multilateration is still little used for civil purposes nowadays, so the way that ionospheric variability influences the quality of position determination for this specific application is not well known. Only analogies can be made with the above mentioned GNSS application (Galileo GNSS, 2014).

Passive receivers can be deployed and maintained by independent users, which can either triangulate the signals from various receivers, or offer their receivers' signals to pools, which in turn can triangulate the signals. The cost of this infrastructure would be funded by the blockchain transaction fees collected in the challenges and validity votes associated to a report and, if no challenges happen, in the final incorporation of the flight report to the blockchain. Various type of sensory data collected by the air vehicles also could be used to help determining other vehicles' positions.

Besides broadcasting its position and altitude, an aircraft participating in this system should broadcast its current OVC and corresponding hash value, provided by the blockchain. This information is used in conflict resolution, in the cases when airspace conflict happens with other aircraft while in flight.

A Blockchain-based solution for inviolable presence determination and registration of mobile entities was presented in (Leal, Pisani, & Endler, 2021), although it uses a variety of sensors and spatial conditions not comparable to the problem of position determination existing in the AAM context.

3. FINAL REMARKS

The system proposed must be implemented in a blockchain capable of smart contracts or in-block programming, either one of the existing ones, or one to be developed specifically with this purpose. It would be successful if a high proportion of the AAM vehicles in a certain region adhere to it. It is not foolproof against uncooperative vehicles (as any centralized system is), however it may be added with features to alert users about the uncooperative drones and register such occurrences with evidences and a certain level of consensus, in a way to discourage such practices.

Regardless of the implementation choices, if such choices are adherent to the definitions of this paper, a highly distributed and redundant system is obtained, where failures in one or a few nodes do not cause a breakdown of the whole system. The overall computational effort resulting from the summation of redundant computations and / or verifications will be probably higher than that of a centralized system with the same purpose, however the components of the system can be developed and verified collaboratively and achieve higher redundancy by having diverse systems and algorithms performing verification. This redundancy does not necessarily cause larger latency for flight-critical decisions, because in-flight decisions need only to make reference to the blockchain blocks. Also, upgrades to the system can be seamless because its distributed nature allows that some nodes of the system are upgraded while others remain with their current versions, so to test updates gradually.

We also consider the possibility of combining some aspects of decentralization and blockchain with the presence of centralized USPs (Unmanned Air Traffic Management Service Providers), either by the USP being fully integrated with the decentralized services, or by the latter ones working as a secondary solution.

The overall concept of blockchain-based traffic management can be applied to surface (road and water) vehicles as well, however the features of these systems may not offer advantages for this concept as large as those envisioned for air vehicles.

4. ACKNOWLEDGEMENTS

We acknowledge the following authors for conceding their artwork used in our figures, obtained from the website flaticon.com:

- Uniconlabs for the handshake icon in Figure 1;
- Freepik for the stamp icon in Figure 1;
- Kosonicon for the drone icon in Figure 3.

5. REFERENCES

Bauranov, A., & Rakas, J. (2021). Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts. *Progress in Aerospace Sciences, 125*(100726). Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100726

EmbraerX; Atech; Harris. (2020). Flight Plan 2030: An Air Traffic Management Concept for Urban Air Mobility. Retrieved from https://daflwcl3bnxyt.cloudfront.net/m/f58fb8ea648aeb9/original/EmbraerX-White-Paper-Flight-Plan2030.pdf

FAA. (2020). Urban Air Mobility - Concept of Operations v1.0. Retrieved from https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf

FAA. (2022). *Urban Air Mobility and Advanced Air Mobility*. Retrieved June 2022, from https://www.faa.gov/uas/advanced_operations/urban_air_mobility

Galileo GNSS. (2014). *The Ionosphere effect to GNSS signals*. Retrieved from https://galileognss.eu/the-ionosphere-effect-to-gnss-signals/

Hsieh, C., Sbai, H., Taylor, H., & Mitra, S. (2021). Unmanned Air-traffic Management (UTM): Formalization, a Prototype Implementation, Verification and Performance Evaluation. *13th NASA Formal Methods Symposium (NFM 2021).* Retrieved from arXiv:2009.04655

Investopedia. (2022). *What does Proof-of-Stake (PoS) mean in crypto?* Retrieved from Investopedia: https://www.investopedia.com/terms/p/proof-stake-pos.asp

Kopardekar, P. (2014). *United States Patent No. US10332405B2.*

Leal, M., Pisani, F., & Endler, M. (2021). A blockchain-based service for inviolable presence registration of mobile entities. *Journal of the Brazilian Computer Society*. doi:https://doi.org/10.1186/s13173-021-00104-y

Romani de Oliveira, Í., Matsumoto, T., Pinto Neto, E., & Yu, H. (2021). Decentralized Air Traffic Management for Advanced Air Mobility. *Integrated Conference on Communications, Navigation and Surveillance (ICNS).*

Romani de Oliveira, I., Pinto Neto, E., Matsumoto, T., Yu, H., Bartolome, E., Frontera, G., & Mayne, A. (2021). Comparing the Performance of Traffic Coordination Methods for Advanced Aerial Mobility. *40th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC).* IEEE. doi:10.1109/DASC52595.2021.9594468

Stefanski, J., & Sadowski, J. (2018). TDOA versus ATDOA for wide area multilateration system. *Journal of Wirelles Communications Network*(179). doi:https://doi.org/10.1186/s13638-018-1191-5

Sultanik, E., Remie, A., Manzano, F., Brunson, T., Moelius, S., Kilmer, E., . . . Schriner, S. (2022, June). Are Blockchains Decentralized? *Report from Trail of Bits commissioned by DARPA.* Retrieved June 30, 2022, from https://t.co/V36rSOmvJc

Sunil, E., Ellerbroek, J., Hoekstra, J., Vidosavljevic, A., Arntzen, M., Bussink, F., & Nieuwenhuisen, D. (2016). An Analysis of Decentralized Airspace Structure and Capacity Using Fast-Time Simulations. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. doi:https://doi.org/10.2514/1.G000528

UK Air Mobility Consortium. (2022, March'). Urban Air Mobility Concept of Operations for the London Area. Retrieved from https://eveairmobility.com/wp-content/uploads/2022/03/UK_Air_Mobility_Consortium_CONOPS.pdf

Wikipedia. (2022a). *Proof-of-Work.* Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Proof_of_work

Wikipedia. (2022b). *Proof-of-Stake*. Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Proof_of_stake

ANÁLISE DO IMPACTO DO *E-COMMERCE* NA EFICIÊNCIA DO TRANSPORTE DE CARGA AÉREA BRASILEIRA DURANTE A PANDEMIA DA COVID-19

Maria Cecília de Farias Domingos, Giovanna Miceli Ronzani Borille, Carolina Silva Ansélmo, Rogéria de Arantes Gomes
Aeronautics Institute of Technology
Viviane Adriano Falcão
Federal University of Pernambuco

*** Corresponding author e-mail address**: mceciliadomingos@hotmail.com

PAPER ID: SIT144

ABSTRACT

With the advance of the Covid-19 pandemic, the air transport sector has become essential in the movement of medicines and personal protective equipment. Also, due to the restrictions of social distance, the behavior of users when shopping has been changing, with the advancement of the online market through e-commerce, which favors air transport. The literature affirms the need for logistics and technology to handle the demand for cargo, and this paper aims to fill the gap on the topic for Brazilian airports. The objective of the study is to obtain the efficiency of the Brazilian airports that most handled cargo in 2019, before and during the Covid-19 pandemic, allowing to assess the importance and growth of the sector in the current context. The results indicate that among 18 airports, 11 showed efficiency of 100.00% in 2019, and that in 2020, even with the presence of the virus, 10 were still efficient. Among the inefficient ones, 2 increased their performance compared to 2019, corroborating the leverage of the freighter market.

Keywords: E-commerce, Brazilian airports, Covid-19, Freighter market.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da malha do transporte aéreo tem ajudado a aumentar o número de passageiros e carga transportada, o que estimula a eficiência do serviço aeronáutico (Wang & Song, 2020). Com relação à carga, pode-se citar que o transporte de mercadorias de alto valor agregado e comercial, em médias e grandes distâncias, é característica do modal aéreo. O modal permite que as empresas cargueiras tenham uma resposta mais rápida da necessidade de seus clientes (Larrodé *et al*., 2018).

Com o rápido desenvolvimento da internet e das tecnologias de informação, surgiu um novo modelo de negócios denominado *e-business* (Chow *et al.*, 2013), o qual possui o *e-commerce* como o ramo de transações comerciais de bens e serviços online. O transporte de cargas aéreas é favorecido com a expansão do *e-commerce*, uma vez que a facilidade de compras online tem tornado o mercado atrativo. A presença da logística no planejamento é essencial para conceder a eficiência no transporte que demanda tarefas dinâmicas e interdependentes. Um sistema de logística de carga é essencial e deve ser autônomo para permitir rápidas respostas a quaisquer mudanças ou condições imprevistas (Chow *et al.*, 2013), como atrasos, problemas técnicos na aeronave e no transbordo.

Concomitantemente com o desenvolvimento da internet, a pandemia da Covid-19 impulsionou o crescimento do *e-commerce*. No final do ano de 2019, surgiu a pandemia do novo coronavírus, afetando diretamente o setor aéreo (IATA, 2020) com queda significativa na demanda de voos domésticos, oferta de voos e taxa de ocupação de passageiros (ANAC, 2020). Em contraste, a pandemia mudou o perfil das operações de logística das empresas, as quais buscaram não interromper suas operações e mantiveram o transporte de encomendas. Com as restrições de distanciamento social e medidas para contenção do vírus, a população brasileira passou a utilizar mais as compras online, popularizando o serviço de *e-commerce*. Ademais, além do *e-commerce*, as consequências da pandemia exigiram o transporte de medicamentos, equipamentos de proteção individual e imunizantes, direcionando a atenção ao transporte aéreo. O uso da tecnologia na compra e no processamento de mercadorias vem aumentando devido a presença do vírus (Bhatti *et al.*, 2020).

O presente trabalho possui o objetivo de avaliar o impacto da pandemia na eficiência do transporte de cargas aéreas nos aeroportos brasileiros. Para isso, é utilizado a Análise Envoltória de Dados (DEA) com dados de movimentação de cargas e passageiros e infraestrutura entre os anos de 2019 e 2020 para os principais aeroportos que movimentam carga no Brasil. O estudo pretende preencher a lacuna na literatura sobre análise de carga aérea em aeroportos brasileiros durante a pandemia da Covid-19. Espera-se contribuir para a academia e permitir que a análise da recuperação do setor cargueiro reforce a importância do modal aéreo e a necessidade contínua de promover o desenvolvimento da logística no transporte de cargas dos terminais brasileiros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Logística de Cargas Aéreas

Com o avanço da globalização e liberalização econômica, a competição entre meios de transportes, inclusive aeroportos, aumentou progressivamente. Para as cargas brasileiras, a falta de conservação da rede rodoviária associada ao baixo incentivo do modal aquaviário e a escassez de malha ferroviária, permite que o modal aéreo seja uma saída viável no transporte de mercadorias. Segundo Larrodé *et al.* (2018), a logística envolve todas as operações das mercadorias, do ponto de origem até o consumo, envolvendo produção, abastecimento de insumos, produção, armazenamento, gestão, transporte e entrega. Em relação ao transporte, pode-se citar o modal aéreo, foco deste trabalho.

A cadeia de transporte de mercadorias aéreas envolve desde o momento que os produtos são despachados para a companhia aérea até a entrega ao consumidor (Larrodé *et al.*, 2018). É válido pontuar que o crescimento da logística no transporte de carga depende de fatores econômicos, operacionais,

tecnológicos e socioambientais. Como exemplos, pode-se citar as tarifas de pouso e armazenagem e capatazia, infraestrutura relativo à presença de terminais de cargas, qualidade do serviço do operador e impactos ambientais através de ruídos e emissão de poluentes (Larrodé *et al.*, 2018). O planejamento e a logística é essencial para a melhoria contínua do transporte, buscando a consolidação do mercado cargueiro aéreo e a minimização dos custos operacionais, através por exemplo, da disposição das mercadorias nos ULD's (*Unit Load Device*).

2.2 Impacto da Covid-19 e Aceleração do E-commerce

A Covid-19 se disseminou em pouco tempo e, em março de 2020, a Organização Mundial da Saúde (OMS) decretou pandemia mundial devido ao novo coronavírus (WHO, 2020). Várias medidas de prevenção alteraram sem precedentes as operações de transporte, e a normalização das advertências e controle da doença sugere que as restrições devem persistir por muito tempo. Não obstante, as medidas de prevenção são direcionadas especialmente aos passageiros, em que a demanda de carga aérea tem sofrido menos com as imposições (Li, 2020). Pode-se afirmar que o contágio promoveu o surgimento de novos *marketplaces*, empresas de bens de consumo e montadoras, e proporcionou o transporte de equipamentos médicos e de proteção individual. Com a melhora da situação pandêmica, a demanda pela aquisição de bens comuns deverá permanecer em ascensão. Adicionalmente, o isolamento imposto pela Covid-19 alavancou o comércio online, através do *e-commerce* (Bhatti *et al.,* 2020). Essa modalidade permite redirecionar os consumidores das lojas físicas para as *onlines* (Shao *et al.*, 2016), se tornando uma ação recorrente quando se proíbe o deslocamento presencial como forma de conter o vírus.

O uso da tecnologia ao realizar compras aumentou, como forma dos varejistas conseguirem atender as demandas dos clientes em meio as restrições impostas (Bhatti *et al.*, 2020). De acordo com pesquisa online realizada por Bhatti *et al.* (2020), 52% de consumidores evitaram fazer compras físicas e em áreas lotadas quando o vírus surgiu. A vantagem do *e-commerce* é a possibilidade de transações comerciais sem limitações geográficas (Chow *et al.,* 2013). O transporte aéreo é favorecido com essa modalidade de compras uma vez que garante rapidez e eficiência no transporte global dos produtos. Li (2020) afirma que em 2019, empresas que atuam com *e-commerce* na China direcionaram seus negócios a logística de transporte aéreo.

Estudos como Shao *et al.* (2016) avaliaram que o *e-commerce* contribui na redução do tempo de compra e congestionamento. Já as desvantagens decorreriam da inexistência de interação com o consumidor, que pode avaliar negativamente à falta de serviço, satisfação atrasada e dificuldade de devolução na loja virtual (Shao *et al.*, 2016). Contudo, o surgimento da Covid-19 acelerou a necessidade da compra online, e o uso da logística no transporte se tornou recorrente para atender a nova demanda global por produtos internacionais que antes eram substituídos por produtos no mercado físico.

Além das consequências da pandemia, pode-se citar como fator contribuidor a liberalização econômica. Segundo Wang & Song (2020), o estímulo da política Chinesa permitiu o aumento da demanda de carga aérea, uma vez que o comércio eletrônico entre fronteiras está em constante ascensão. O Governo chinês decidiu emitir políticas para melhorar a capacidade de frete aéreo da China e aumentar a competitividade das companhias aéreas no mercado de logística internacional, o que ajuda a eliminar fatores prejudiciais a eficiência da carga aérea (Li, 2020). Ainda, Li (2020) pontua que a carga aérea pode alcançar a demanda anterior a pandemia mais rapidamente do que a de passageiros. Ele afirma que no final de maio de 2020, na China, o tráfego aéreo de passageiros não havia atingido a metade do quantitativo no mesmo período em 2019, enquanto o de cargas já estava muito próximo ao movimentado.

2.3 Análise Envoltória de Dados (DEA)

O DEA é o método mais difundido na literatura para avaliar a eficiência relativa de aeroportos (Lin & Hong, 2006; Tsui *et al*., 2014; Iyer & Jain, 2019; Ngo & Tsui, 2020; Guner *et al.*, 2021). Desenvolvido por Charnes *et al.* (1978), o DEA é um modelo não-

paramétrico, o qual calcula a eficiência relativa para um *Decision Making Unit* (DMU) considerando o peso de vários outros DMU's (Wanke & Barros, 2017; Iyer & Jain, 2019). A premissa do método é medir o desempenho relativo entre DMU's, gerando um único indicador de desempenho para cada DMU do grupo avaliado, a partir da relação ponderada entre produtos e insumos (Lin & Hong, 2006).

A análise do indicador decorre pela comparação entre DMU's que se encontram sob ou distante da fronteira de eficiência, o que as caracterizam como eficientes ou ineficientes, respectivamente (Lin & Hong, 2006; Iyer & Jain, 2019; Ngo & Tsui, 2020; Toledo *et al.*, 2021). Na presença de uma DMU ineficiente, avalia-se a forma de trazê-la para mais perto da fronteira. Para o estudo da eficiência relativa, há possíveis métodos de avaliação, entre eles, o DEA-CCR e DEA-BCC. O modelo CCR possui retorno de escala constante para ambos *inputs* e *outputs*, enquanto o modelo BCC utiliza uma medida mais realista, permitindo retornos variáveis de escala (Lin & Hong, 2006).

Lin & Hong (2006) avaliaram o desempenho operacional de vinte aeroportos internacionais a partir do DEA. Quatro modelos DEA foram aplicados, com o objetivo de averiguar a análise das variáveis por valor de eficiência, folga, sensibilidade e peso. Em relação ao peso das variáveis, os resultados indicaram que, para os *inputs*, o número de funcionários, pistas e vagas de estacionamento contribuíram mais para a performance operacional dos terminais. Já para os *outputs*, a movimentação de passageiros foi mais significante. Guner *et al.* (2021) estudaram a eficiência ambiental de 23 aeroportos na Eurásia a partir do novo *Fuzzy Double-Frontier Network DEA*. Os *outputs* corresponderam a movimentação de passageiros e cargas e os níveis de emissões de poluentes das aeronaves, e os *inputs* se relacionaram com o uso da infraestrutura disponível, movimentação e consumo de combustível. A partir destes, foi possível construir um modelo para manter as emissões sob controle, maximizar a movimentação de passageiros e cargas e minimizar o consumo de combustível. Nesse contexto, pretende-se aplicar o DEA com os dados de movimentação e infraestrutura para análise da eficiência do setor de cargas, uma vez que há uma lacuna na literatura de estudos sobre o tema. Os estudos supramencionados não utilizaram dados de área de terminal de cargas e de tonelada transportada, por exemplo, sendo o presente estudo direcionado a contribuir com a temática e apontar a importância do setor cargueiro no ramo aéreo.

3. MODELO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Caracterização da Demanda

A pandemia do novo coronavírus tem afetado diferentemente a movimentação de passageiros e carga aérea nos aeroportos brasileiros. A Figura 1 apresenta o percentual de crescimento entre a movimentação de cargas e passageiros dos aeroportos brasileiros nos meses de 2020 em comparação com os de 2019 (ANAC, 2021). É possível observar que a recuperação de cargas em relação ao mesmo período em 2019 é mais rápida do que a de passageiros. Em dezembro de 2020, restavam apenas 7,49% das cargas aéreas para alcançar o valor transportado no mesmo período do ano anterior, enquanto para os passageiros, o valor era de 40,92%. Essa situação corrobora com a necessidade do transporte aéreo de cargas durante o período de isolamento social no país, e evidencia a retomada do setor por fatores atrelados tanto à suprimentos médicos como os de uso pessoal com o avanço do *e-commerce*, *marketplaces*, montadoras e empresas de bens de consumo.

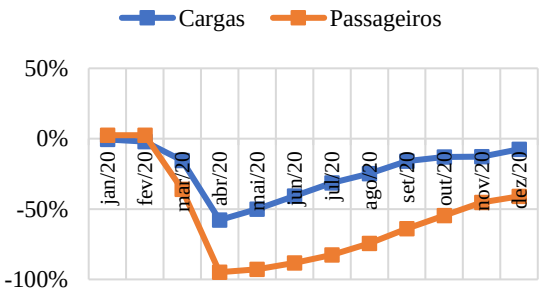


Figura 1 Percentual de crescimento anual de cargas e passageiros em 206 aeroportos, entre janeiro a dezembro/2020. Fonte: ANAC, 2021.

Da mesma forma, Li (2020) afirma que muitas companhias aéreas chinesas aumentaram a demanda de carga por converter

os assentos de passageiros nas aeronaves por transporte de produtos. Assim como a China, o Brasil precisava de muitos materiais médicos de proteção e vacinas advindos do exterior, o que promoveu uma retomada para as transportadoras. Ademais, pode-se citar que devido a logística e a concentração de voos, muitos aeroportos nacionais serviram como base para recebimento e posterior despacho dos materiais para diversos terminais no país.

3.2 Banco de Dados e Modelagem

Para análise do transporte de cargas no país, aplicou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA) entre os anos de 2019 e 2020, buscando obter o *ranking* de eficiência no setor previamente e durante a ascensão da pandemia. Para isso, verificou-se os 20 aeroportos brasileiros que mais movimentaram cargas em 2019, de acordo com a base de dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2021). A utilização da ferramenta DEA, neste trabalho, considera a escolha das DMU's a serem avaliadas, a saber, os aeroportos da amostra descritos na Tabela 1. Em seguida, são selecionadas as variáveis de interesse, caracterizadas pelos *inputs* e *outputs* definidas pelos estudos prévios realizados (Lin & Hong, 2006; Guner *et al.*, 2021; Toledo *et al.*, 2021) e pela disponibilidade de dados. Nesse contexto, as variáveis de *input* foram a área do terminal de cargas (para avaliar a capacidade de recebimento e armazenamento das cargas analisadas), área do terminal de passageiros (para analisar o desempenho da infraestrutura durante a pandemia) e o comprimento de pista (devido à necessidade de os aviões cargueiros movimentarem-se em pistas longas e pavimentadas); e para *outputs*: a carga (representando a movimentação total de carga naquele aeroporto), bem como os passageiros (introduzindo a oscilação na movimentação de passageiros durante os anos).

Seguindo as premissas da DEA, foram relacionadas as variáveis de interesse, aplicando o modelo BCC orientado a *output*, uma vez que há interesse do setor aeroportuário na maximização dos produtos. Os dados foram processados no MaxDEA (2021), sendo um cenário para o ano de 2019 e o outro para o ano de 2020. As escolhas dos aeroportos brasileiros basearam-se na importância que possuem para o transporte de carga do país, tanto o volume movimentado, quanto a capacidade e localizações estratégicas para outras logísticas de transporte. Entretanto, é válido pontuar que devido a acessibilidade de dados, dentre os 20 aeroportos, 2 foram retirados do modelo, entre eles, Aeroporto de Vitória e Aeroporto Internacional de Brasília. Com relação a análise dos dados, pode-se citar que entre as variáveis de *inputs*, apenas a área total do terminal de passageiros do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro e do Aeroporto Internacional de Porto Alegre expandiu em 2020, alcançando, respectivamente, 409.959 m² (Aeroportos Brasil, 2021) e 72.000 m² (Fraport Brasil, 2021), sendo os demais aeroportos permanecendo com a mesma infraestrutura para ambos os anos. Já em relação as variáveis de *outputs*, como esperado, a movimentação de passageiros e cargas reduziu em 2020 em comparação com o ano de 2019, com exceção para a movimentação de cargas do Aeroporto Internacional de Viracopos e Manaus, o qual obtiveram, respectivamente, 24,07% e 3,10% e de crescimento no ramo de um ano para o outro. A Tabela 1 abaixo aponta o percentual de oscilação de passageiros e cargas para cada terminal em estudo. É possível notar, em geral, a recuperação mais rápida do transporte de cargas, sendo o Aeroporto Internacional de Viracopos com melhor retomada e o Aeroporto Internacional de Salvador, com a pior.

Tabela 1: Percentual de movimentação de passageiros e cargas de 2019 para 2020.

ICAO	Aeroporto	Pax	Carga
SBGR	Aeroporto Internacional de São Paulo	-52,86%	-26,61%
SBKP	Aeroporto Internacional de Viracopos/Campinas	-36,99%	24,07%
SBEG	Aeroporto Internacional de Manaus	-42,79%	3,10%
SBGL	Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro	-67,02%	-48,88%
SBSP	Aeroporto de São Paulo/Congonhas	-69,32%	-71,24%
SBRF	Aeroporto Internacional de Recife	-45,45%	-20,80%

ICAO	Aeroporto	Pax	Carga
SBFZ	Aeroporto Internacional de Fortaleza	-56,41%	-29,58%
SBCF	Aeroporto Internacional de Confins	-56,70%	-44,05%
SBSV	Aeroporto Internacional de Salvador	-50,13%	-51,09%
SBPA	Aeroporto Internacional de Porto Alegre	-58,14%	-40,96%
SBCT	Aeroporto Internacional de Curitiba	-61,13%	-39,48%
SBBE	Aeroporto Internacional de Belém	-43,32%	-19,18%
SBSG	Aeroporto de São Gonçalo do Amarante	-49,28%	-41,76%
SBGO	Aeroporto de Goiânia	-56,29%	-50,60%
SBCY	Aeroporto Internacional de Cuiabá	-50,27%	-42,29%
SBRJ	Aeroporto do Rio de Janeiro	-45,26%	-1,10%
SBFL	Aeroporto Internacional de Florianópolis	-52,35%	-44,24%
SBSL	Aeroporto Internacional de São Luís	-50,56%	-41,05%

3.3 Resultados e Discussões

Após a aplicação do modelo DEA-BCC orientado a output, realizou-se a análise da eficiência anual dos 18 aeroportos da amostra para os anos de 2019 e 2020, considerando o esperado para o período de crise pandêmica. Na Figura 2 são apresentados os resultados da amostra de eficiência dos terminais.

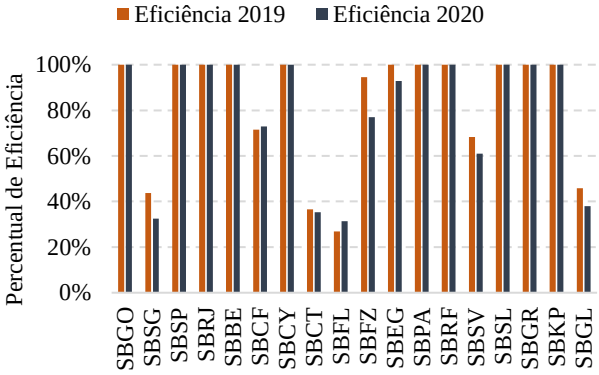


Figura 2: Eficiência anual dos aeroportos brasileiros.

Os resultados da Figura 2 mostram valores de desempenho gerais elevados para as variáveis consideradas, com média de eficiência de 82,64% e 80,05% para os anos de 2019 e 2020, respectivamente. Para o ano de 2019, observa-se que 11 aeroportos apresentaram eficiência de 100,00%, entre eles, SBGO, SBSP, SBRJ, SBBE, SBCY, SBEG, SBPA, SBRF, SBSL, SBGR e SBKP. Já os terminais SBSG, SBCF, SBCT, SBFL, SBFZ, SBSV e SBGL apresentaram desempenho abaixo da fronteira, sendo SBFL o mais deficiente, com 26,92%. No ano da crise pandêmica, 10 terminais ainda apresentaram eficiência de 100,00%, com exceção de SBEG. É importante mencionar que o Aeroporto Internacional de Manaus é o principal distribuidor de cargas da região e possui função de destaque por se encontrar na região da Zona Franca, grande polo industrial. Nota-se que os mesmos 7 terminais do ano de 2019 permaneceram com baixa eficiência, porém SBCF e SBFL elevaram seus desempenhos em relação ao ano anterior, com um aumento de 1,92% e 16,44%, respectivamente.

Os aeroportos internacionais estão aptos ao aumento da eficiência devido a ascensão do *e-commerce*, o qual proporciona novos investidores e transportadores, e consequentemente, demanda por transporte aéreo. Li (2020) afirma que durante a pandemia, novas rotas de cargas aéreas foram criadas, e que o acelerado crescimento do *e-commerce* transnacional tem sido apontado como outro avanço para impulsionar o comércio exterior. Na amostra em estudo, observa-se que 2 aeroportos internacionais aumentaram o desempenho em 2020, mas que 5 perderam eficiência. Este trabalho relaciona-se com a eficiência produtiva e a falta de dados desagregados impossibilita relacionar com a movimentação apenas do *e-commerce*, por exemplo. Portanto, o resultado indica que uma DMU ineficiente pode possuir voos internacionais de carga, devido a influência positiva do *e-commerce*, mas que há outros fatores, como a infraestrutura e a capacidade de transporte das aeronaves, que podem afetar o desempenho. Da mesma forma, pode-se citar o fato da obtenção de dados de carga apenas para vacinas e equipamentos de saúde.

Pode-se afirmar que a ineficiência de alguns terminais pode estar relacionada a oscilação de demanda e da capacidade de infraestrutura, em relação aos terminais que se encontram na fronteira. A Tabela 2 mostra a eficiência medida pelo modelo para cada aeroporto, as folgas relativas de cada variável e sua classificação no *ranking*. De acordo com Toledo *et al.* (2021), a folga não pode ser uma meta fixa, mas uma indicação da variável de desempenho mais prejudicial, do ponto de vista produtivo. Com base nas folgas relativas, o modelo sugere uma redução nas variáveis de insumos e um aumento no produto para cada DMU atingir a fronteira eficiente, em ambos os anos. Nota-se também que as folgas médias relativas nos *inputs* são mais recorrentes em comparação com as folgas médias relativas nos *outputs*, o que indica que as variáveis de pista, TPS e TECA possuem maior folga e assim, precisam de mais atenção.

Tabela 2: Ranking dos Aeroportos e Folgas Relativas para cada variável.

				Redução de *Inputs*			Aumento de *Outputs*	
Ano	ICAO	*Ranking*	Eficiência 2019	Pista	TPS	TECA	Pax	Carga
2019	SBGO	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBSP	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBRJ	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBBE	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBCY	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBEG	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBPA	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBRF	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBSL	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBGR	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBKP	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBFZ	2	94,56%	0,00%	-13,74%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBCF	3	71,55%	0,00%	-54,59%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBSV	4	68,33%	-4,73%	-23,39%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBGL	5	45,83%	-35,11%	-33,93%	0,00%	0,00%	30,19%
2019	SBSG	6	43,78%	0,00%	-25,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBCT	7	36,50%	-0,58%	-34,99%	0,00%	0,00%	0,00%
2019	SBFL	8	26,92%	-22,10%	-26,84%	0,00%	0,00%	31,95%
2020	SBGO	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBSP	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBRJ	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBBE	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBCY	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBPA	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBRF	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBSL	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBGR	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBKP	1	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBEG	2	92,82%	0,00%	-16,80%	0,00%	105,53%	0,00%
2020	SBFZ	3	76,97%	0,00%	-41,50%	0,00%	0,00%	0,00%
2020	SBCF	4	72,92%	0,00%	-56,91%	-6,26%	0,00%	87,66%

2020	SBSV	5	61,04%	-36,47%	-35,08%	0,00%	0,00%	43,23%
2020	SBGL	6	37,99%	-37,38%	-52,98%	0,00%	0,00%	116,50%
2020	SBCT	7	35,30%	-20,88%	-34,82%	0,00%	0,00%	94,85%
2020	SBSG	8	32,50%	0,00%	-20,79%	0,00%	78,29%	0,00%
2020	SBFL	9	31,34%	-24,69%	-20,72%	0,00%	0,00%	423,35%

A análise da Tabela 2 permite identificar que os aeroportos SBGO, SBSP, SBRJ, SBBE, SBCY, SBPA, SBRF, SBSL, SBGR e SBKP permaneceram na melhor posição do *ranking* em ambos os anos, apenas alternando de posição devido a SBEG ter deixado de estar na fronteira em 2020. Observa-se que dentre estes, apenas 3 terminais são domésticos, corroborando com a contribuição do mercado internacional. No tocante as folgas, para o ano de 2019, SBFZ possui o maior escore de eficiência entre os ineficientes e o modelo especifica que para atingir a fronteira, deve-se aumentar a movimentação de cargas, enquanto para o ano de 2020, o terminal SBEG passa a ocupar a posição, sendo necessário aumentar a movimentação de passageiros para alcançar 100,00%. Esse último fato explica o fato de SBEG ser um importante terminal de cargas no norte do país, sendo, portanto, ineficiente em relação ao transporte de passageiros. Em relação a SBFL, último do *ranking*, há a necessidade de aumentar em 423,35% a movimentação de cargas do terminal em 2020 para torná-lo eficiente.

Ademais, dentre os aeroportos com necessidade de redução de *inputs*, apenas o aeroporto SBEG não era concessionado durante o período de estudo. Infere-se o possível aumento de superestrutura nos primeiros anos de privatização para atender a demanda prevista, o que pode causar a ineficiência. Conforme Toledo *et al.* (2021), há necessidade da revisão de contratos de concessão dos aeroportos brasileiros para evitar superávit de capacidade de infraestrutura em previsões irreais de demanda. Identificar aeroportos ineficientes pode ajudar na tomada de decisões para melhorar a gestão aeroportuária, inserir aeroportos com capacidade subutilizada na rede aérea quando os hubs estão muito saturados (Toledo *et al.*, 2021) e frisar a importância da logística no comércio de cargas devido ao aumento promissor do *e-commerce*.

Nesse contexto, nota-se que apesar da crise pandêmica enfrentada no país, o mercado de carga aérea permaneceu com movimentações e eficiência de transporte elevadas. Conforme citado anteriormente, à medida que a crise do coronavírus se expande, a demanda por equipamentos médicos e de proteção individual aumenta em muitos lugares do mundo, o que justifica os cenários obtidos. Da mesma forma que Li (2020), ratifica-se a necessidade do desenvolvimento do setor cargueiro, principalmente devido as transportadoras terem se tornado essenciais na movimentação de medicamentos e equipamentos de proteção. Ainda, Li (2020) afirma que as empresas cargueiras podem obter vantagens estendendo seus serviços de frete aéreo puro a uma cadeia de suprimentos abrangente, alavancando o mercado online.

4. CONCLUSÃO

Com o avanço da pandemia da Covid-19, o transporte aéreo de cargas tornou-se essencial no transporte de medicamentos e equipamentos de proteção individual. Com as restrições de distanciamento social, o comportamento dos usuários perante compras vem mudando, com o avanço do mercado online através do *e-commerce*, o que favorece o transporte aéreo. A revisão bibliográfica realizada aponta a necessidade da logística e da tecnologia para comportar a demanda de cargas, sendo este trabalho voltado para a preencher a lacuna na literatura sobre o tópico para aeroportos brasileiros. Pelo conhecimento dos autores, não há estudos na literatura que analisam a eficiência de aeroportos brasileiros em relação ao transporte de cargas antes e durante a pandemia da Covid-19. O DEA é um método difundido na literatura para medir a eficiência de terminais. Este trabalho aplica o DEA para avaliar a eficiência produtiva dos aeroportos que mais movimentam cargas no Brasil, com o intuito de verificar como o mercado de cargas contribuiu para o

desempenho dos terminais. Para este trabalho, os resultados do DEA indicam que 11 aeroportos apresentaram eficiência de 100,00%, e 7 ineficientes, sendo SBFL o mais deficiente, com 26,92%. Para o ano de 2020, entre esses 7, 2 terminais, a saber SBCF e SBFL, elevaram seus desempenhos em relação ao ano anterior, com um aumento de 1,92% e 16,44%, respectivamente.

No ano da crise pandêmica, 10 terminais ainda apresentaram eficiência de 100,00%, com exceção de SBEG. As folgas indicaram que para esse terminal, o qual é o maior na região norte e o terceiro no Brasil, é necessário aumentar a movimentação de passageiros para atingir a fronteira. Assim, o terminal em questão torna-se ineficiente em relação ao transporte de passageiros. Em geral, as folgas sugerem uma redução nas variáveis de insumos e um aumento no produto para cada aeroporto atingir a fronteira eficiente, em ambos os anos. Sabe-se que houve muitas restrições de distanciamento social para minimização do espalhamento do vírus, e por isso, a demanda de passageiros reduziu significativamente. Da mesma forma, o transporte de cargas também foi afetado, mas a recuperação da movimentação vem se dando de forma mais rápida, devido ao transporte de vacinas, medicamentos e equipamentos de proteção individual, uma vez que os insumos demandam trocas internacionais e alta velocidade de percurso. Ainda, o mercado de *e-commerce* está em constante ascensão, sendo impulsionado no período pandêmico, com a mudança comportamental de usuários que tendem a preferir o comércio online. Isso favorece o crescimento de plataformas, transportadoras e consequentemente a demanda pelo modal aéreo.

Conclui-se que o *ranking* de eficiência dos aeroportos durante a pandemia perante o transporte de cargas não alterou significativamente em comparação com os dados prévios a presença do vírus e as restrições impostas por ele. Para melhorias do setor, o trabalho sugere o aumento da capacidade nas aeronaves, o uso de tecnologias que permitem a eficiência da logística, com os drones e a *blockchain*, bem como a implementação de inteligência de mercado na integração de modais. Enfatiza-se de que os resultados estão limitados a disponibilidade de dados e tamanho da amostra, e que estudos futuros poderiam inserir novas variáveis que representem a economia e o mercado, como o quantitativo de vendas por *e-commerce*.

References

ANAC (2020) Agência Nacional de Aviação Civil. Acesso em 28 Ago, 2021, disponível em https://www.anac.gov.br/noticias/2020/demanda-domestica-por-voos-cai-32-9-em-marco-apos-pandemia-do-novo-coronavirus.

ANAC (2021) Agência Nacional de Aviação Civil. Ministério da Infraestrutura e Secretária Nacional de Aviação Civil. Acesso em 03 Set, 2021, disponível em https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Movimentacao/Comparativo.

Aeroportos Brasil (2021). Acesso em 01 Set, 2021, disponível em https://www.aeroportosdobrasil.com.br/rio_de_janeiro_rj/antonio_carlos_jobim_rj/terminal_carga_aerea_aeroporto_do_rio_de_janeiro_antonio_carlos_jobim_rj.php.

Bhatti, A., Akram, H., Basit, H.M., Khan, A.U., Naqvi, S.M.R., & Bilal M. (2020) E-commerce trends during COVID-19 pandemic. International Journal of Future Generation Communication and Networking, v. 13, (pp.1449-1452).

Charnes, A., Cooper, W.W., & Rhodes, E. (1978). Measuring efficiency of decision-making units. European Journal of Operational Research, v. 2, n. 6, (pp. 429-444). doi: https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8.

Chow, H.K.H., Siu, W., Chan, C.K., & Chan H.C.B (2013) An argumentation-oriented multi-agent system for automating the freight planning process. Expert Systems with Applications, v. 40, (pp. 3858-3871). doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.042

Fraport Brasil (2021). Acesso em 01 Set, 2021, disponível em https://portoalegre-airport.com.br/pt/cargas-aeroporto-

internacional-porto-alegre-salgado-filho/novo-terminal-de-cargas.
IATA (2020) International Air Transport Association. Acesso em 01 Set, 2021, disponível em https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/june-data-and-revised-air-travel-outlook/.
ICAO (2018) International Civil Organization. Acesso em 17 Ago, 2020, disponível em https://www.icao.int/annual-report-2018/Documents/Annual.Report.2018_Air%20Transport%20Statistics.pdf,
Iyer, K.C., & Jain, S. (2019). Performance measurement of airports using data envelopment analysis: A review of methods and findings. Journal of Air Transport Management, v. 81. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101707
Larrodé, E., Muerza, V., & Villagrasa, V. (2018) Analysis model to quantify potential factors in the growth of air cargo logistics in airports. Transportation Research Procedia, v. 33, (pp. 339-346). doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.111.
Li, T. (2020) A SWOT analysis of China´s air cargo sector in the context of COVID-19 pandemic. Journal of Air Transport Management, v. 88. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101875
Lin, L., & Hong, C. (2006). Operational performance evaluation of international major airports: An application of data envelopment analysis. Journal of Air Transport Management, (pp. 342-351).
MaxDEA (2021) MaxDEA 8 Ultra (4-Core) 8.1.0. Beijing Realworld Software Company Ltd. Berkelaar, M., Eikland, K., Dirks, J., Notebaert, P. Acesso em 09 Out, 2021, disponível em http://maxdea.com.
Ngo, T., & Tsui, K.W.H. (2020). A data-driven approach for estimating airport efficiency under endogeneity: An application to New Zealand airports. Research in Transportation Business & Management, v. 34. doi: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2019.100412.
SAC (2020) Secretaria de Aviação Civil. Website Hórus. Acesso em 17 Ago, 2021, disponível em https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Movimentacao/Ranking.
Shao, J., Yang, H., Xing, X., & Yang, L. (2016) E-commerce and traffic congestion: An economic and policy analysis. Transportation Research Part B, v. 83, (pp. 91-103). doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2015.11.003.
Toledo, F.S., Falcão, V.A., Camioto, F.A., & Silva, P.A.L. (2021). Does Privatization Make Brazilian Airports More Efficiente? Transportes, v 29. doi: http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2304.
Tsui, W.H.K., Balli, H.O., Gilbey, A, & Gow, H. (2014). Operational efficiency of Asia-Pacific airports. Journal of Air Transport Management, v. 40, (pp. 16–24). doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.05.003.
Wanke, P. & Barros, C.P. (2017). Efficiency thresholds and cost structure in Senegal airports. Journal of Air Transport Management, v. 58, (pp. 100–112). doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.10.005.
Wang, Z., & Song, W. K. (2020) Sustainable airport development with performance evaluation forecasts: A case study of 12 Asian airports. Journal of Air Transport Management, v. 89. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101925
WHO (2020) World Health Organization. Acesso em 05 Set, 2021, disponível em https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020.

ENVIRONMENTAL EFFICIENCY DURING PUBLIC AIRPORT CONCESSION: THE CASE OF RECIFE INTERNATIONAL AIRPORT

Maria Cecília de Farias Domingos, Evandro José da Silva, Rogéria de Arantes Gomes, Mauro Caetano
Aeronautics Institute of Technology
Viviane Adriano Falcão
Federal University of Pernambuco

*** Corresponding author e-mail address**: mceciliadomingos@hotmail.com

PAPER ID: SIT143

ABSTRACT

Airport concessions have increased worldwide to raise scale efficiency levels and adapt to future demand. Many studies focus on assessing the operational efficiency, but few these assess during the concession period and how management change can affect the environment. Considering the lack of evidence on how privatization can contribute to the airport's environmental efficiency, this study focuses on analyzing the efficiency of Recife International Airport. Data Envelopment Analysis has been applied with operational and economic variables, followed by the Tobit Regression to understand how the efficiency is affected by infrastructure and environmental factors. The results indicate that during concession, factors such as the construction phase and peak operating costs are likely to reduce operating efficiency. Furthermore, infrastructure improvements provide more efficient traffic movement, and the greater the fuel consumption, the greater the movement of aircraft and consequent operational performance. It is concluded that factors such as the impact of aircraft emissions on air quality near the terminal must be taken into account in concession studies to contribute to measures that maximize environmental efficiency. One of the main contributions of this study refers to the method of analysis of airport operational variables to support management decisions related to airport infrastructure concessions.

Keywords: Air transport, Airport planning, Data Envelopment Analysis, Public concessions.

.

1. INTRODUCTION

Considered as the country's economic driver, the air modal has been experiencing a progressive increase in passenger and cargo demand, consequent bottlenecks and recurring concessions. Brazil has adopted measures to increase scale efficiency levels and adapt to future demand. Since the mid-1970s, the sector has been the target of economic deregulation and consequent privatization, which boosted the desire to maximize efficiency within the processing of passengers, aircraft and cargo (Lin & Hong, 2006).

The increased demand for air transport without the infrastructure and planning can negatively impact the quality of service and the relationship with the environment. Kim et al. (2014) confirm that increased efficiency is not guaranteed after privatization of a transport system. Once the quantity of pollutants from aircraft increase, for example, it impacts on air quality and consequently on the health of residents who lives in the airport vicinity.

Data Envelopment Analysis (DEA) estimates the efficiency of airports relative to the inputs and products considered and compares them with the efficiency frontier, obtained by the best sample performances (Ngo & Tsui, 2020). The objective of the model is to calculate the weights of input and output variables so that the efficiency obtained can be maximized (Iyer & Jain, 2019). Additionally, a second stage of analysis can be used to assess the influence of explanatory variables on the efficiency weight obtained in the DEA. Associations with exogenous factors provide a better understanding of the contextual setting in which the airport operates (Iyer & Jain, 2019).

Studies carried out by Lin & Hong (2006), Tsui et al. (2014), and Ngo & Tsui (2020) use DEA models to analyze the efficiency of different airports in different countries. Toledo et al. (2021) evaluate the efficiency of Brazilian airports during periods of concession. Notwithstanding, to the authors knowledge, there are none studies that assess how external factors related to the environment can affect the operational efficiency of airports during the operations of private companies.

The Recife International Airport (SBRF) was granted to Aena Desarrollo Internacional for 30 years, starting operations in 2021. Due to the importance of SBRF for the Northeast region of Brazil and for the national air system, studies regarding its terminal performance and efficiency, allow the analyses of gaps that can contribute to serious environmental costs. That said, the objective of the present study is to evaluate the environmental efficiency of SBRF during the concession horizon, herein, the future operational performance minus the unwanted effect, through the emission of pollutants from the aircraft. In this context, an innovative idea of this paper is to seek the presence of environmental impacts and consequences on airport efficiency during the concession period, since the not commonly evaluated possibility of negative factors associated with management change. This study allows pointing out possible relevant factors in the analysis of operational performance, contributing to the decision-making of airport administrators and operators, and to the literature regarding the use of the second stage analysis of the DEA with an environmental variable.

2. AIRPORT ENVIRONMENTAL EFFICIENCY AND CONCESSIONS

The global movement of economic deregulation has motivated many countries to privatize their transport systems (Kim et al., 2014). For Brazil, the increased use of air transport in recent decades has driven improvements in operations and terminal infrastructure, promoting the action of private management (Toledo et al., 2021). Rolim et al. (2016) state that privatized airports can be more efficient due to their capacity to expand, attract airlines and produce development strategies, and that they are likely to produce a greater demand because they are linked to more flexible management, allowing, for example, engagement in route development strategies with existing and new airlines.

Measuring airport efficiency is essential both for companies and for the State, to understand the bottlenecks of each airport, as well as to assess the viability of investments and the operational performance of the granted

terminals (Toledo et al., 2021). In contrast, there are still uncertainty whether concessions produce favorable and efficient results. It is known though that after the transition in the administration and operation of airport terminals, an increase in the flow capacity of passengers, cargo and aircraft is expected.

Rolim et al. (2016) confirm that a change in management has an effect on the efficiency of airports and airlines in generating demand, however, they do not assess the impact of demand on the environment. Therefore, concession is expected to be a successful solution for airports in an emerging country marked by substantial bottlenecks, as is the case in Brazil, at least on the demand side. In contrast, there is no evidence that the increased flow ensures protection around the airport since, for example, the increased movement of aircraft produces more pollutant emissions and aeronautical noise.

Efficiency assessment is essential to analyze the adequacy of demand and the results of current and future concessions in airport productivity (Toledo et al., 2021). There are few studies in the literature that have evaluated the efficiency of post-concession transport systems. Kim et al. (2014) study the efficiency of four highways in Japan after privatization, and state that the efficiency levels of privatized companies depended on the size of their operational capacity and the sophistication of their technologies. Pagano et al. (2014), whilst studying the privatized ports of Panama and the United States, which have different types of management, state that there is a tendency for privatized maritime terminals to have greater economic performance than public ones.

The involvement of private companies in terminals can promote sustainable measures, which can affect the efficiency of the system, with the presence of, for example, water reuse, installation of smart devices with automatic sensors in stairs, elevators and restrooms and encouragement the saling of reusable and recyclable products. Notwithstanding, Arbolino et al. (2018) state that there is no guarantee that privatization will result in the desired environmental efficiency during the entire contractual period. Thus, in the efficiency analysis, in addition to operational and financial variables, factors that affect the environment must also be taken into account, such as the impact of aircraft emissions, linked to fuel consumption.

It is considered that the analysis of the time horizon during the concession period makes it possible to assess critical management points, especially between the concession models. In this context, the average performance of an airport under concession during a given year compared to other years is relevant, as it indicates whether any period was the one with the best performance in relation to the general efficiency of the terminal (Tsui et al., 2014). That said, as the analysis of efficiency allows to discriminate the positive aspects of the management, operation and infrastructure of airports, there is an increase of studies in the literature on performance evaluation with the premise of defining objectives and growth targets for airport terminals (Lin & Hong, 2006; Tsui et al., 2014; Wanke & Barros, 2017; Ngo & Tsui, 2020; Guner et al., 2021, Toledo et al., 2021).

For the analysis of multiple decision-making units, inputs and outputs, Data Envelopment Analysis (DEA) is essential for evaluating the performance of terminals (Lin & Hong, 2006). Studies that apply Data Envelopment Analysis are identified in assessing the operational efficiency of airports in Eurasia (Guner et al., 2021), Africa (Wanke & Barros, 2017), Oceania (Lin & Hong, 2006; Ngo & Tsui, 2020), Asia Pacific (Tsui et al., 2014; Lin & Hong, 2006), America (Lin & Hong, 2006) and Europe (Lin & Hong, 2006). The studies apply different DEA models to analyze the operational and environmental efficiency, albeit they seek to complete the gap in the literature regarding the understanding of the impact of the concession and the environment on the efficiency weights. A second stage analysis is an option to explain the DEA results, since the results are deterministic between the variables used and there is the possibility of verifying the impact of exogenous factors on the efficiency scores. The second stage commonly applies simple regression, truncated regression or bootstrapping (Toledo et al., 2021).

It can be mentioned that Wanke & Barros (2017) apply two stages analyses to assess how the capital-labour ratio and the asset cost ratio

reflect on the efficiency of Senegal's airports, and how this can lead to policy formulation. They use probabilistic chance-constrained DEA followed by (Support Vector Machine) SVM Regression, with inputs corresponding to number of employees and runway length and outputs as passenger, aircraft and cargo movement. In addition to these inputs and outputs, they apply cost variables, such as price of capital, price of labor, cost asset ratio, and whether cargo is operating, to control efficiency scores, allowing for operational diversity or scope.

Among the results obtained, it appears that high levels of efficiency for the airports in the sample are influenced by trained employees, which reflects on their salaries, and thus, on the price of labor. Regardless, for airports with low efficiency, performance is associated with cargo operations, price of capital and cost asset ratio, which suggests that economies of scale and scope are ways to maximize operations when efficiency is low (Wanke & Barros, 2017). The authors demonstrate that the efficiency of Senegal's airports is not only associated with infrastructure variables, but rather with the quality of human resources, operational scope and capital intensity.

3. METHODOLOGY

To develop this study, Data Envelopment Analysis (DEA) and Tobit Regression method were used, regarding the prospect of evaluating the environmental efficiency of Recife International Airport (SBRF) during its concession period. With the chosen methodology, it was aimed to evaluate how the efficiency of the concession terminal can be affected by unwanted effects, such as aircraft emissions, correlated to fuel consumption. It is known that, when forecasting the increase in traffic demand and consequent infrastructure expansions, there is a heighten in air pollution around the airport, which affects the surrounding population.

The methodology configuration is defined as the first stage analysis, through DEA, followed by the second stage, through Tobit regression. According to Ngo & Tsui (2020), the DEA is used to estimate the efficiency of airports and compare them with the best practice frontier, whilst the Tobit regression is used to determine the main factors that affect this efficiency.

DEA is the most widespread method in the literature to assess the relative efficiency of airports (Lin & Hong, 2006; Tsui et al., 2014; Iyer & Jain, 2019; Ngo & Tsui, 2020; Guner et al., 2021). Developed by Charnes et al. (1978), DEA is a non-parametric model, which calculates the relative efficiency for a Decision-Making Unit (DMU) considering the weight of several other DMU's (Wanke & Barros, 2017; Iyer & Jain, 2019). According to Lin & Hong (2006), a DMU will be under the efficiency frontier when it has the best combination of inputs and outputs. In this context, the DEA is one of the existing techniques capable of identifying the most efficient DMU's and pointing out inefficiency measures to the others. According to Wanke & Barros (2017), the model compares the production units, and afterwards orders them, according to the inputs used and the products generated. For the case under study, the DMU's are the years, as the performance of the terminal will be analyzed over a period of time.

The relative efficiency comes from the comparison of each weight of the DMU's with the efficiency frontier, which is formed by the DMU's that have the maximum ratio between outputs and inputs (Ngo & Tsui, 2020). The analysis of the indicator results from the correlation amid DMUs that are under or far from the efficiency frontier, which characterize them as efficient or inefficient, respectively (Lin & Hong, 2006; Iyer & Jain, 2019). In the presence of an inefficient DMU, how to bring it closer to the border is evaluated. For the study of relative efficiency, there are possible evaluation methods, including the DEA-CCR and DEA-BCC.

The CCR model was developed to analyze constant returns to scale (Lin & Hong, 2006; Bogetoft & Otto, 2011), that is, maximizing output with the fixed input share or minimizing inputs with the fixed output share. According to Bogetoft & Otto (2011), constant returns to scale indicate that, when a pair of input and output is viable, any point between (0,0) and the pair of input and output is likewise viable.

In contrast, the BCC model indicates variable returns to scale, where the efficiency score differs between the choice of input or output orientation. The relative efficiency of the DMU starts at point (0,0), continues to increase, stabilizes, and then decreases, that is, when moving the boundary towards more inputs, the return to scale follows straight lines with different angles, with growth, stabilization and degrowth (Bogetoft & Otto, 2011). Figures 1 and 2 show the production frontiers for the DEA-CCR and DEA-BCC models, respectively.

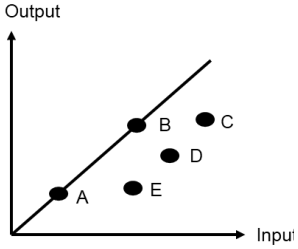


Figure 1: Production Frontier - DEA-CCR

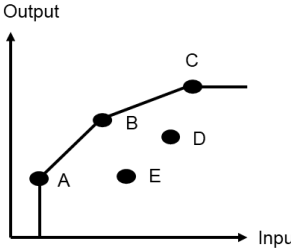


Figure 2: Production Frontier - DEA-BCC

Source: Adaptaded Bogetoft & Otto (2011).

Thus, Figure 1 represents the efficiency frontier by a 45º straight line, indicating that the inputs and outputs are proportional to each other. Figure 2, on the contrary, demonstrates that the efficiency frontier has a convex shape, consisting of a set of straight lines with different angles. As the study in question will use the years as DMU's, the analysis of Figure 1 and Figure 2 would indicate, respectively, years C, D and E and D and E as inefficient.

The approach that combines a first-stage DEA analysis and a second-stage Tobit model is able to identify the determinants that influence the efficiency variation. Initially, DEA scores are computed and then submitted to multivariate analysis for correlation with a set of explanatory variables (Wanke & Barros, 2017). Therefore, in the second stage analysis, Tobit regression is applied to verify the influence of key factors on the DMU's efficiencies. The estimation is carried out using the technique of ordinary least squares (MQO), which minimizes the sum of squares of the deviations between the estimated and observed values of the sample (Gujarati & Porter, 2011). The regression is called Tobit, since the dependent variable comes from the weights of the efficiencies obtained in the first stage analysis, and hence, it is limited to the range from 0 to 1 (Ngo & Tsui, 2020).

Ngo & Tsui (2020) apply the second stage analysis, known as IV-Tobit Regression, in order to solve the problem of the endogeneity of the DEA model and identify the determinants of airport efficiency. Furthermore, they used the dynamic approach of the DEA-Window Analysis to overcome the barrier of low discriminatory power when using few variables. It detects the efficiency trends of each DMU's relative to current technology. The whole DMU performances are compared over time, albeit they are treated differently for each time interval (Ngo & Tsui, 2020). For this, they use a sample of 11 airports in New Zealand during the period 2006 and 2017. The inputs used are expenses with employees, operating expenses and runway length, and the outputs, aeronautical and non-aeronautical revenues and aircraft handling. By applying the DEA-Window Analysis, the results indicate that the airports in the sample are inefficient during the aforementioned period, operating around 23.7% below the optimal level of efficiency and capacity. This corroborates for the introduction of management measures to enhance the inputs.

Regarding the use of the IV-Tobit Regression, it is estimated that among the airports in the sample, the two most efficient ones have greater movements of domestic and international flights and are located in cities with high GDP per capita. Therefore, the regression was applied to examine the impacts of external factors on efficiency, such as tourism, economic development and natural disasters like earthquakes, which were verified as positively correlated with high performance.

Likewise, the study proposes to apply the two stages analysis and to asses which factors affect the annual efficiencies of SBRF. In addition, it is of interest to insert variables that may be related to environmental impact. For this reason, it is applied the concept of aircraft emissions, linked to fuel consumption. The variables used are correlated with the concession of the terminal located in Recife (SBRF). Subsequently, through Tobit regression, the impact of exogenous factors on future efficiency was evaluated.

The choice of the study for SBRF comes from this being one of the airports granted as a block in Brazil in 2019. In one of the most recent concessions, the Northeast block consists of six airports, in which SBRF has the largest passenger movement. The airports were granted to Aena Desarrollo Internacional, with operations beginning in 2020. Due to its area of influence and local economy, SBRF is Azul Airlines' regional hub, making it the company's flight hub in the Northeast. Therefore, the airport shows significant importance in the Brazilian airport sector.

The sample used includes operational and environmental variables for SBRF, during the concession years, between 2020 and 2048. To carry out the study, the following variables were used as inputs: i) runway length; ii) total area of the TPS; iii) operating costs; iv) parking spaces. For the outputs, the following were considered: i) annual movement of passengers; ii) cargo handling. The description and units of the variables used can be seen in Table 1.

Table 1: Inputs and outputs data

		Description	Unit
Inputs variables	Runway length	Runway Length	Meters
	Total area of TPS	Passenger terminal area, plus the parking area	Square meters
	Operating costs	Costs and expenses with personnel, outsourced service, utilities, consumables, variable grant, communication and air control and others	Real currency
	Parking spaces	Number of parking spaces	n
Outputs variables	Movement of passengers	Passengers (boarding and landing)	n
	Cargo handling	Cargo (and post)	n

The variables presented in Table 1 are derived from the EVTEA (2018), which gathers data on the existing situation of the terminal under study and assesses the direct and indirect benefits arising from investments during the concession period. For the application of the method, according to Bogetoft & Otto (2011), the number of DMU's behave according to Equation 1.

$$K \geq 3 * (m + n), K \succ m * n \qquad (1)$$

For Equation 1, m refers to the number of inputs and n the number of outputs. That said, the amount of DMU's corresponds to the expected number of years of concession of the terminal. Therefore, the minimum number of DMUs for the study is 9. As the interval adopted for analysis is from 2020 to 2048, which accounts for 28 years, the minimum criterion is accorded. In the present study, the output-oriented DEA-BCC model was applied since the airport sector is interested in maximizing products. Data were processed in MaxDEA (2021). Subsequently, the Tobit Regression was applied to verify how the environmental efficiency of SBRF could be affected during concession period.

Equation 2 represents this regression, with the dependent variable corresponding to the airport efficiency weights amid the years of study, originated from the first stage analysis, that is, from the DEA model.

$$Efficiency = \beta_0 + \beta_1 * FuelConsumption + \beta_2 * AreaTPS + u \qquad (2)$$

where β0 and β1 are, respectively, the intercept and slope and u the stochastic error.

Initially, tests were performed to assess the collinearity and statistical significance amid the variables that explain the efficiency of SBRF over the years. Several variables were tested, namely, runway length, operating costs, quantity of parking spaces and passenger and cargo movement, but their inclusion in the model resulted in inadequate statistical measures. Therefore, when starting the analysis between the variables, it was observed that the best correlation with efficiency

resulted from the association with fuel consumption (ANAC, 2021) and the passenger terminal area (EVTEA, 2018). The explanatory variables have the same time horizon as those applied in the DEA.

The choice of the statistical model was based on the significance of the variables and the quality of the statistical tests verified through the R-squared (R^2), p-value and stat-t. The p-value must have a value less than or equal to 0.10 for the null hypothesis of the test to be rejected and the stat-t must have a modulus greater than 1.96 for a significance of 5% (Gujarati & Porter, 2011).

It is noteworthy that, with the premise of inserting a variable that reflects on the environment, the quantity of fuel of the aircraft to land and take off in SBRF was used during the years of study, since the aircraft use fuel as a primary source to activate the engines. Thus, the fuel proxy variable seeks to quantify emissions around the airport, on the premise that they are correlated with each other.

According to the National Emissions Inventory of Civil Aviation (ANAC, 2019), emissions in the cruise flight phase are not considered, since the aircraft is at an altitude of more than 914.4 meters, deemed negligible its impact on air quality. In this context, the measurement of emissions to the surroundings of the terminal takes place through the LTO (Landing and Take-Off) cycle, which includes the steps of flights close to the aerodrome, corroborating to the premise of the analysis through aircraft fuel consumption to land and take off.

4. RESULTS ANALYSIS

After applying the output-oriented DEA-BCC model, an analysis of the annual efficiency of SBRF was carried out during the years 2020 and 2048, considering what was expected for the period of concession of the terminal. In Figure 3, the results of the efficiency sample for the aforementioned years are presented.

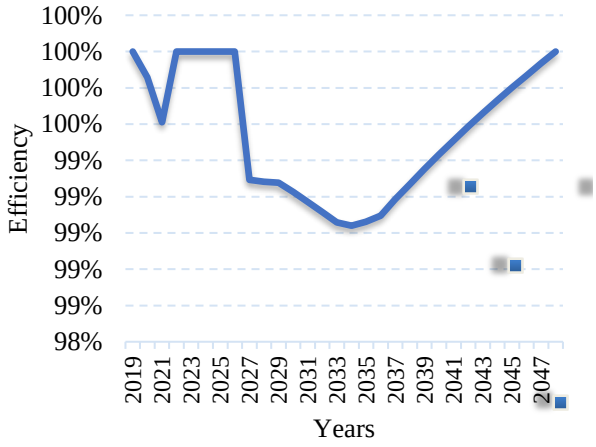


Figure 3 Annual Efficiency of SBRF.

The results in Figure 3 show efficiency values above 99.00%, indicating that, during the years of study, the airport has a high operational performance for the variables considered. It is observed that in the first two years of the concession, 2020 and 2021, SBRF is inefficient due to possible factors such as the length of the runway, which will go from 3.008 m to 2.497 m in 2021, due to the insertion of the RESA (Runway End Safety Area). The RESA allows for an increase in the safety of operations, and thus, the consequent efficiency.

Furthermore, for these two years, the operating cost is heightened, about 4 times more than the other years, due to the interventions foreseen in the first phase of construction of the development plan proposed by EVTEA (2018).

Between 2022 and 2026, SBRF will present maximum level of efficiency. The period coincides with the end of the first phase of construction, so that the airport will have infrastructure to meet the expected demand until the year 2028 (EVTEA, 2018), with the expansion of the TPS area and quantity of

parking spaces, by example. In contrast, from 2027 onwards, which corresponds to the beginning of the second phase of construction, the airport will suffer a reduction of 99.77% by 2035. Thus, it can be said that during the occurrence of renovations, carried out to meet the expected growth of the output variables, SBRF tends to reduce the efficiency of operations. This is mainly due to possible interventions and layout reorganizations on the landside and airside during operations. Solely from 2036 onwards, will the airport show an increase in efficiency, reaching the frontier again in 2048, the last year of the concession. Table 2 shows the ranking of concession years in descending order of efficiency. The inefficiency of a few years may be related to fluctuations in the forecast for the movement of passengers, aircraft and cargo, as well as operating costs.

Table 2 Ranking of SBRF's concessions years

Year	Efficiency	Year	Efficiency
2019	100,00%	**2041**	99,51%
2022	100,00%	**2040**	99,43%
2023	100,00%	**2039**	99,35%
2024	100,00%	**2027**	99,29%
2025	100,00%	**2028**	99,28%
2026	100,00%	**2029**	99,28%
2048	100,00%	**2038**	99,27%
2047	99,93%	**2030**	99,23%
2046	99,87%	**2037**	99,19%
2020	99,86%	**2031**	99,17%
2045	99,80%	**2032**	99,11%
2044	99,73%	**2036**	99,10%
2043	99,66%	**2035**	99,06%
2021	99,61%	**2033**	99,06%
2042	99,59%	**2034**	99,04%

According to Table 2, it is noted that only 7 years presented themselves as efficient (2019, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026 and 2048). Therefore, considering the evaluation of every year, 23.33% are efficient. These can be considered as benchmarking years, so that inefficient years should seek to reduce the weight of input variables and increase the outputs to reach the frontier. It is worth mentioning that the proposal to reduce resources to reach the border does not mean that investments in the airport should be minimized (Toledo et al., 2021).

Subsequently, the second stage analysis was applied, through the Tobit Regression, with the premise of identifying variables that can influence the efficiency measured in the DEA and the possible relationship with the environment, not explored in previous studies. The analysis of environmental sustainability would take place through the impact of aircraft emissions, associated with fuel consumption, hence linked as a proxy variable. The coefficients and statistical tests can be seen in Table 3.

Table 3: Results from Tobit Regression

	Coefficient	Standard Deviation	Stat-t	p-value	
Constant	1,01744	0,00299	339,90000	<0,0001	***
Fuel consumption	3,76E-12	4,95E-13	7,60000	<0,0001	***
Total area of TPS	−7,74E-07	9,59E-08	−8,06600	<0,0001	***

It is noteworthy that there is statistical significance in the influence of the total area of the TPS and fuel consumption. Through the signs of the coefficients, it can be seen that the size of the passenger terminal is positively related to the greater measured efficiency, as it seeks to improve the infrastructure to deal with the movement of traffic more efficiently.

Furthermore, it is understood that operational efficiency is greater as fuel consumption increases. This indicates that higher consumption provides greater aircraft movement and consequent satisfactory operation for SBRF during the concession period. In contrast, it is not possible to verify the impact of aircraft emissions, associated with fuel consumption, around the terminal.

A study proposed by Toledo et al. (2021) evaluated the operational efficiency of privatized air terminals but did not insert variables that

would explain the impact on the environment. Hence there is no evidence that privatization provides more efficient airports in terms of environmental sustainability. There is the possibility of aggravation of pollutants from aircraft for air quality as well as for the residents surrounding the airport, and this aspect needs to be evaluated in future studies. It is emphasized that the results are limited to the availability of variables and sample size, and that concession studies explore demand forecasts that may take longer to materialize due to the country's economic instability.

5. CONCLUSIONS

Brazil has established the concession policy as a way to improve the administration and management of national airports, promoting competitiveness in the sector and reducing public resources. Under concession management, airports are expected to increase their passenger and aircraft processing capacity, which can positively impact in operational efficiency, but not necessarily environmental efficiency.

As far as the authors know, there are few studies in the literature that analyze the efficiency of just one air terminal, and none that assess how external factors related to the environment can affect the operational efficiency of the airport.

DEA is a widespread method in the literature to measure the efficiency of terminals. This study applies DEA to assess the operational efficiency of Recife International Airport (SBRF), operated by Aena Desarrollo Internacional, during the concession period and futhermore, through the Tobit Regression, to analyze how unwanted factors, such as aircraft emissions, affect efficiency.

In this context, the objective of this study is to evaluate the impact of the concession of SBRF around the airport, that is, how operational efficiency can be affected by the unwanted effect of aircraft emissions. Fuel consumption is adopted as a proxy variable to assess emissions during the LTO (Landing and Take-Off) cycle, in which the aircraft are at an altitude of up to 914.4 meters.

For this study, DEA results indicate that seven years will be over the efficiency frontier, and that for the remaining years, factors such as construction phase period and peak operating costs are likely to reduce performance.

Additionally, the influence of infrastructure and fuel consumption variables on the terminal's efficiency was evaluated. It appears that the passenger terminal area and fuel consumption are positively and negatively related to higher measured efficiency, respectively. It is understood that improvements in infrastructure provide more efficient traffic movement, and that the greater the consumption, the greater the movement of aircraft and consequent operational performance for SBRF during the concession period. In contrast, it is not possible to verify the impact of aircraft emissions, associated with fuel consumption, on air quality in the vicinity of the terminal.

The limitation of this study is due to the availability of data on aircraft emissions in the LTO cycle and the statistical correlations between the variables that affect the weights of annual efficiencies obtained in the DEA. In this context, for future studies, it is necessary to test new variables correlated with emissions to conclude the concession's inferences on the impact on the environment and population around the airport.

References

ANAC (2019). Agência Nacional de Aviação Civil - Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil. Retrived Mar 24, 2021, from https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-da-aviacao-civil.

ANAC (2021). Agência Nacional de Aviação Civil. Retrived Mar 12, 2021, from https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/empresas-aereas/envio-de-informacoes/base-de-dados-estatisticos-do-transporte-aereo.

Arbolino, R., Carlucci, F., Cirà, A., Simone, L.D., Ioppolo, G., & Yigitcanlar, T. (2018). Factors affecting transport privatization: An empirical analysis of the EU. Transportation Research Part A, v. 110, (pp. 149-160). doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.02.016

Bogetoft, P., & Otto, L. (2011). Benchmarking with DEA, SFA, and R. International Series in Operations Research & Management Science, v. 157. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7961-2.

Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring efficiency of decision-making units. European Journal of Operational Research, v. 2, n. 6, (pp. 429-444). doi: https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8.

EVTEA (2018). Estudo de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental. Agência Nacional de Aviação Civil. Retrived Apr 14, 2021, from ftp://ftpaeroportos.transportes.gov.br/.

Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2011). Econometria Básica (5th ed.). AMGH Editora Ltda.iyer

Guner, S., Cebeci, H., Antunes, J., & Wanke, P. (2021). Sustainable efficiency drivers in Eurasian airports: Fuzzy NDEA approach based on Shannon's entropy. Journal of Air Transport Management, v. 92.

Iyer, K.C., & Jain, S. (2019). Performance measurement of airports using data envelopment analysis: A review of methods and findings. Journal of Air Transport Management, v. 81. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101707

Kim, H. J., Kim, S.W., & Shin, J. S. (2014). Efficiency Analysis of Privatization Using DEA and MPI. Public Performance & Management Review, v. 38:1, (pp. 48-75). doi: http://dx.doi.org/10.2753/PMR1530-9576380103.

Lin, L. & Hong, C. (2006). Operational performance evaluation of international major airports: An application of data envelopment analysis. Journal of Air Transport Management, (pp. 342-351).

MaxDEA (2021). MaxDEA 8 Ultra (4-Core) 8.1.0. Beijing Realworld Software Company Ltd. Berkelaar, M., Eikland, K., Dirks, J., Notebaert, P. Retrived May 27, 2021, from http://maxdea.com.

Ngo, T., & Tsui, K.W.H. (2020). A data-driven approach for estimating airport efficiency under endogeneity: An application to New Zealand airports. Research in Transportation Business & Management, v. 34. doi: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2019.100412.

Rolim, P.S.W., Bettini, H.F.A.J., Oliveira, A.V.M. (2016). Estimating the impact of airport privatization on airline demand: A Regression-based event study. Journal of Air Transport Management, v. 54, (pp. 31-41). doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.03.019

Toledo, F.S., Falcão, V.A., Camioto, F.A., & Silva, P.A.L. (2021). Does Privatization Make Brazilian Airports More Efficiente? Transportes, v 29. doi: http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2304

Tsui, W.H.K., Balli, H.O., Gilbey, A., & Gow, H. (2014). Operational efficiency of Asia-Pacific airports. Journal of Air Transport Management, v. 40, (pp. 16–24). doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.05.003.

Pagano, A.M., Wang, G.W.Y., Sánchez, O.V., & Ungo, R. (2014). Impact of Privatization on port efficiency and effectiveness: results from Panama and US Ports. Maritime Policy & Management, v. 40, (pp. 110-115). doi: http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2012.756589.

Wanke, P., & Barros, C.P. (2017). Efficiency thresholds and cost structure in Senegal airports. Journal of Air Transport Management, v. 58, (pp. 100–112). doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.10.005.

Website Hórus (2020). Ministério da Infraesrtutura e Secretária Nacional de Aviação Civil. Retrived Apr 28, 2021, from https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Movimentacao/Comparativo.

ANÁLISE DAS DESFORMAÇÕES NAS CAMADAS DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE TRENS DE POUSO

Lucas Cavalcante de Almeida, Antonia Fabiana Marques Almeida, Lucas Moreira Magalhães, Felipe Hernandes Cava, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

*** E-mail do autor de correspondência**: lucascavalcante@det.ufc.br

PAPER ID: SIT181

RESUMO

Algumas características específicas das operações aeroportuárias fazem da condição estrutural dos pavimentos de um aeródromo um dos fatores mais importantes a serem avaliados para garantia da segurança operacional de pousos e decolagens. Nesse sentido, a forma como a carga aplicada pelas diferentes configurações dos trens de pouso das aeronaves é distribuída nas camadas do pavimento torna-se uma das principais influências nos projetos de pavimentação aeroportuária. Portanto, diante do exposto, este artigo tem como objetivo determinar as deformações obtidas pelos *softwares* AEMC e o MePADS, que trabalham de forma elástica linear, para três configurações de trens de pouso de aeronaves e em quatro locais diferentes de análise para os deslocamentos da fibra inferior do revestimento e do topo do subleito. No estudo comparativo foram utilizados cinco tipos de aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso (rodas duplas, tandem duplo e tandem triplo) e de peso máximo de decolagem (PMD). Foi verificado que, a depender da distribuição e do número de rodas, as deformações das camadas podem variar consideravelmente. Por consequência, cada fabricante deve fornecer os pesos típicos, pressão dos pneus e configurações de trens de pouso de aeronaves, pois esses dados servem como referência para o projeto de um pavimento aeroportuário. Os resultados mostraram que as aeronaves que possuem maior PMD não são as que mais contribuem para os maiores deslocamentos nos locais de análise do pavimento aeroportuário independente do *software* utilizado, requerendo, portanto, análises mais detalhadas das aeronaves de menores pesos.

Palavras-chave: Pavimento, Aeroporto, Trem de pouso, Deformações.

1. INTRODUÇÃO

A condição estrutural dos pavimentos aeroportuários é um dos fatores mais importantes a ser monitorado para garantir a segurança nas operações. As demandas por transporte de maiores quantidades de passageiros e de cargas gera uma necessidade de operação de aeronaves de maior porte. Essas aeronaves, consequentemente, são mais pesadas, gerando aumento das cargas aplicadas à estrutura dos pavimentos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a função de um pavimento é proteger as camadas inferiores da carga imposta na estrutura, proporcionando uma superfície de rolamento adequada para os usuários com conforto e segurança. No caso de aeroportos, além dos usuários é importante garantir a integridade das aeronaves, sobretudo seus trens de pouso.

Os pavimentos aeroportuários não são substancialmente distintos dos rodoviários, diferindo-se basicamente na repetição e amplitude de cargas aplicadas. No caso das infraestruturas aeroportuárias, existe uma magnitude superior da força aplicada pelas aeronaves durante pousos e decolagens, ocasionadas por: pressão de enchimento e largura dos pneus, configuração dos trens de pouso, posicionamento do centro de gravidade das aeronaves, seção geométrica da via e espessuras das camadas do pavimento (Yoder & Witczak, 1975 *apud* Durán, 2015).

Nesse sentido, entre os principais fatores que influenciam o projeto de pavimentos aeroportuários, é como a carga aplicada pela aeronave será avaliada nas camadas do pavimento. Portanto, é fundamental a compreensão sobre a geometria das aeronaves, sobretudo da configuração do trem de pouso.

Diante do exposto, este artigo tem o objetivo de determinar as deformações (na base do revestimento e no topo do subleito) obtidos por dois *softwares* que trabalham de forma elástica linear para diferentes configurações de trens de pouso de aeronaves. Ambos os *softwares* fazem o cálculo de tensões e das deflexões teóricas que as estruturas sofrem em decorrência de carregamentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O pavimento aeroportuário, sobretudo a pista de pouso e decolagem, está sujeita ao desgaste tanto funcional quanto estrutural devido às cargas impostas pelas aeronaves. Para cumprir requisitos de conforto e segurança para o usuário, faz-se necessário estudar os fatores, incluindo as aeronaves que solicitarão respostas estruturais adequadas do pavimento aeroportuário.

2.1. Configurações de trens de pouso

Em pavimentos aeroportuários, as aeronaves utilizadas na aviação civil utilizam diversas configurações de trem de pouso. Nesse sentido, conforme Horonjeff (2010), existem três configurações básicas de trem de pouso: rodas simples, rodas duplas e tandem duplo, conforme pode ser observado na Figura 1.

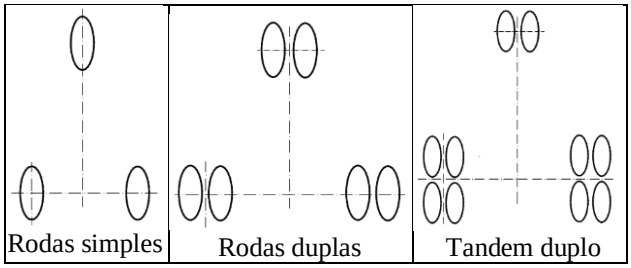


Figura 1 Configurações tradicionais do trem de pouso (Fonte: FAA, 2005).

Ainda de acordo com Horonjeff (2010), existem configurações mais complexas como as utilizadas no Boeing 747, Boeing 777 e Airbus 380. As configurações dos trens de pouso das aeronaves mencionadas são apresentadas na Figura 2.

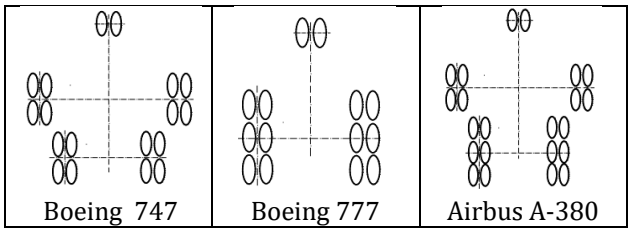


Figura 2 Configurações complexas de trem de pouso (Fonte: FAA, 2005).

É fundamental, de acordo com Vieira (2015), compreender as configurações dos trens de pouso, haja vista que eles distribuem o peso da aeronave ao pavimento, proporcionando impacto significativo no projeto dos pavimentos dos aeródromos. A depender do número e da

distribuição das rodas, a magnitude (em termos de deslocamento e de deformação das camadas) pode ser maior ou menor. Consequentemente, cada fabricante deve fornecer os pesos típicos (Peso Máximo de Decolagem – PMD, sobretudo), pressão dos pneus e configurações de trens de pouso de aeronaves, pois esses dados servem como referência para o projeto de um pavimento aeroportuário.

As diferenças de configuração de trens de pouso de aeronaves podem causar solicitações diferentes ao pavimento durante operações, mesmo que a distribuição de peso para cada pneu seja semelhante. Shabani & Zarei (2017) e Rezende (2018) estudaram as tensões verticais e horizontais em pavimentos de concreto e de asfalto para as aeronaves Boeing 777-300R e Airbus 380-800, por meio de elementos finitos no software ABAQUS. Para todos os tipos de pavimentos, as tensões observadas na aeronave B777-300R foram maiores, expondo que o A380-800 tem melhor configuração e distribuição de cargas para as situações estudadas.

2.2 Deformações em camadas de pavimentos aeroportuários

Por meio do avanço de tecnologia computacional, tornou-se possível investigar e analisar o comportamento estrutural dos pavimentos aeroportuários, seja por *softwares* que trabalham de forma elástica-linear ou com aplicação do método de elementos finitos (MEF).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), tratando-se de pavimentos, as tensões horizontais, deformações e deslocamentos verticais são os mais importantes para sua análise ou dimensionamento, pois são os parâmetros com valores mais expressivos. Assim, o comportamento dos pavimentos flexíveis deve ser analisado em função da deformação permanente, controlada pela deformação vertical no topo do subleito, e por trincas de fadiga, determinada pela tensão horizontal na base do revestimento.

As deformações verticais atuantes em uma estrutura de pavimento são relevantes na verificação de possíveis rupturas das camadas granulares, haja vista que deformações plásticas podem ocorrer na estrutura. Esses critérios de ruptura abordam as deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico e de compressão no topo da camada do subleito, e suas formulações podem ser observadas nas equações (1) para o revestimento e (2a) e (2b) para o topo do subleito (FAA, 2009).

$$\log C = 2{,}68 - 5 \log \varepsilon H - 2{,}655 \log E_A \quad (1)$$

Onde:

C = número de aplicações de tensões máximas sobre a superfície do pavimento aeroportuário para a ruptura decorrentes das decolagens anuais;

εH = máxima deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico;

E_A = módulo elástico do revestimento asfáltico (psi).

$$C = \left(\frac{0{,}004}{\varepsilon_v}\right)^{8{,}1}, \text{ quando } C \leq 12.100 \quad (2a)$$

$$C = \left(\frac{0{,}002428}{\varepsilon_v}\right)^{14{,}21}, \text{ quando } C > 12.100 \quad (2b)$$

Onde:

ε_v = máxima deformação de compressão no topo do subleito.

Wabulita & Van de Ven (2000) denotam a importância da análise de tensões para a modelagem de estruturas de misturas asfálticas, principalmente para camadas delgadas de rolamento. Foi observado que os fatores preponderantes na mudança do tempo de serventia do pavimento foram a espessuras da camada, a constante elástica do material e o carregamento aplicado a camada.

2.3 Avaliação estrutural de pavimentos por simulação computacional

As simulações computacionais para a verificação de tensões na implementação de pistas são recorrentes em projetos aeroportuários. Portanto, cumprem as condições ideais de serventia necessárias para atender as operações nos aeroportos.

Kawa *et al.* (2007) avaliaram diferentes *softwares* (LEDFAA, FEDFAA e FAARFIELD), sendo os resultados desse último mais de acordo com os valores reais obtidos por meio de testes. Isso pode ser explicado pelo

FAARFIELD incorporar o cálculo de tensão por meio de elementos finitos tridimensionais.

Além do método dos elementos finitos, análises multicamadas também são empregadas no dimensionamento e avaliação de pavimentos, tanto rodoviário quanto aeroportuário. O AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas) é um *software* de análise de tensões e deformações em conjunto com o MeDiNa (Franco & Mota, 2010).

Os usos acadêmicos do AEMC incluem os estudos de Lima *et al*. (2020) na avaliação do comportamento mecânico de solos lateríticos simulados com testes de modulo de resiliência e deformação permanente. Os resultados indicaram que a capacidade estrutural das amostras avaliadas para deformação permanente máxima foi suficiente para as condições de tráfego rodoviários.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O método desenvolvido neste artigo compreende três etapas: (i) obtenção das deformações na fibra inferior do revestimento; (ii) obtenção das deformações no topo do subleito; e (iii) análise comparativa dos dados obtidos nos dois *softwares*.

Para a análise foram considerados os trens de pouso de cinco aeronaves: Embraer 195 (E-195), Airbus 320 (A320) e três modelos de Boeing (B737-800, B767 e B777). Os *softwares* utilizados foram o AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas), desenvolvido no Brasil, e o MePADS (*Mechanistic Empirical Pavement Analysis and Desing Software*) com desenvolvimento na África do Sul.

3.1 Características do pavimento e das aeronaves analisadas

O pavimento aeroportuário no qual foram realizadas as simulações possui as características expostas na Tabela 1. Os módulos de elasticidade foram obtidos por meio de retroanálises a partir de dados do equipamento HWD (*Heavy Weight Deflectometer*) em uma pista de pouso e decolagem brasileira no ano de 2020.

Tabela 1 Características do pavimento

Camada	Espessura (cm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Revestimento	18	3.738
Base	28	1.321
Sub-base	28	388
Subleito	-	480

A Tabela 2 apresenta as informações das cinco aeronaves consideradas na análise. Foram dispostos dados de características físicas e mecânicas para auxiliar na compreensão das deformações que as aeronaves geram no pavimento aeroportuário.

Tabela 2 Informações físicas e mecânicas das aeronaves para dimensionamento (semieixo)

Parâmetros	Dados				
Aeronave	E195	A320	B737-800	B767	B777
Trem de Pouso	Rodas duplas	Rodas duplas	Rodas duplas	Tandem Duplo	Tandem Triplo
Número de rodas	2	2	2	4	6
% Trem de Pouso	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475
PMD (kg)	48.950	70.400	79.242	204.570	352.442
Carga por roda (kN)	116,256	167,200	188,200	242,927	279,017
Dual *spacing* (mm)	864	927	864	1163	1397
Tandem *spacing* (mm)	-	-	-	1372	1463
Pressão de Pneus (kPa)	1062	1220	1407	1482	1503

A Figura 3 fornece as informações do trem de pouso das aeronaves E-195, A-320 e B737-800. A Figura 4 apresenta o trem de pouso do B767. A Figura 5 ilustra o trem de pouso do B777. A Figura 6 representa as deformações nos pontos analisados do pavimento aeroportuário: a fibra inferior do revestimento asfáltico (ε_t) e o topo do subleito (ε_c).

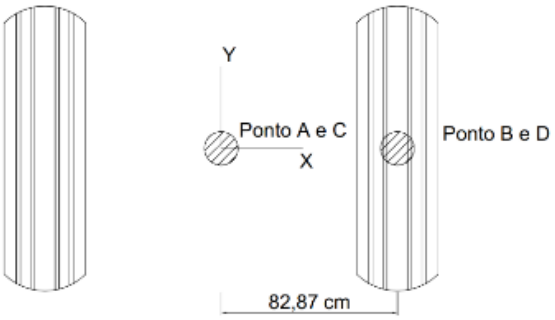


Figura 3 Trem de pouso das aeronaves E-195, A-320 e B737-800.

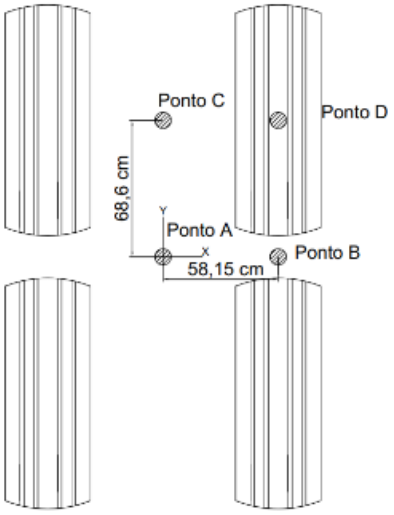


Figura 4 Trem de pouso da aeronave B767.

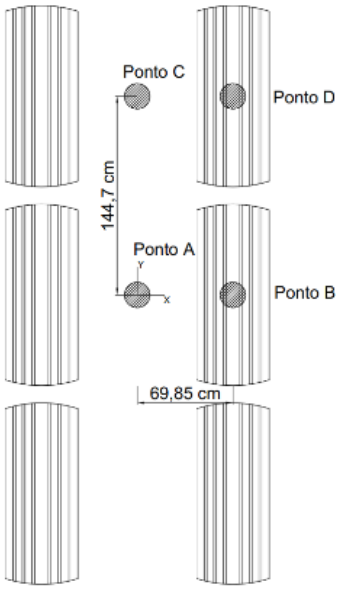


Figura 5 Trem de pouso da aeronave B767.

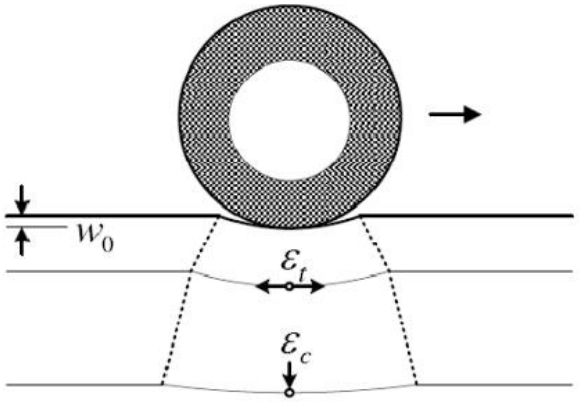


Figura 6 Indicação das deformações na fibra inferior do revestimento (ε_t) e no topo do subleito (ε_c) analisadas (Fonte: Jaritngam *et al.*, 2010)

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando os PMD das aeronaves selecionadas observou-se que os trens de pouso de rodas duplas possuem menor PMD, e as duas consideradas com tandem, o duplo e o triplo, tem esse parâmetro superior. Como exemplo, o B767 tem cerca de 258% a mais de PMD quando comparado ao B737-800.

Com relação às cargas que são aplicadas por roda, em kN, a variação ocorre da mesma forma que o PMD, sendo os valores maiores para àquelas aeronaves com trem de pouso do tipo tandem. Nesse caso, porém, a diferença é inferior, sendo o B767 com cerca de 129% a mais de carga por roda em relação ao B737-800.

Foram calculadas as deformações resultantes dessas cargas em dois pontos: na fibra inferior do revestimento e no topo do subleito. O intuito foi verificar a homogeneidade dos resultados obtidos entre os dois. Os gráficos das Figuras 7 e 8 apresentam as deformações, considerando as cinco aeronaves e quatro diferentes pontos de análise: o centro de gravidade (CG) (A), entre as rodas tandem (B), entre as rodas (C) e abaixo da roda (D). Foram originados os gráficos apresentados pelas figuras 5 e 6, de deformação horizontal na fibra inferior do revestimento e a deformação vertical no topo do subleito, respectivamente. Nesses gráficos, adotou-se um código em que o primeiro algarismo se refere ao *software* utilizado, AEMC (A) ou MePADS (M), seguido de hífen com a sigla da aeronave considerada.

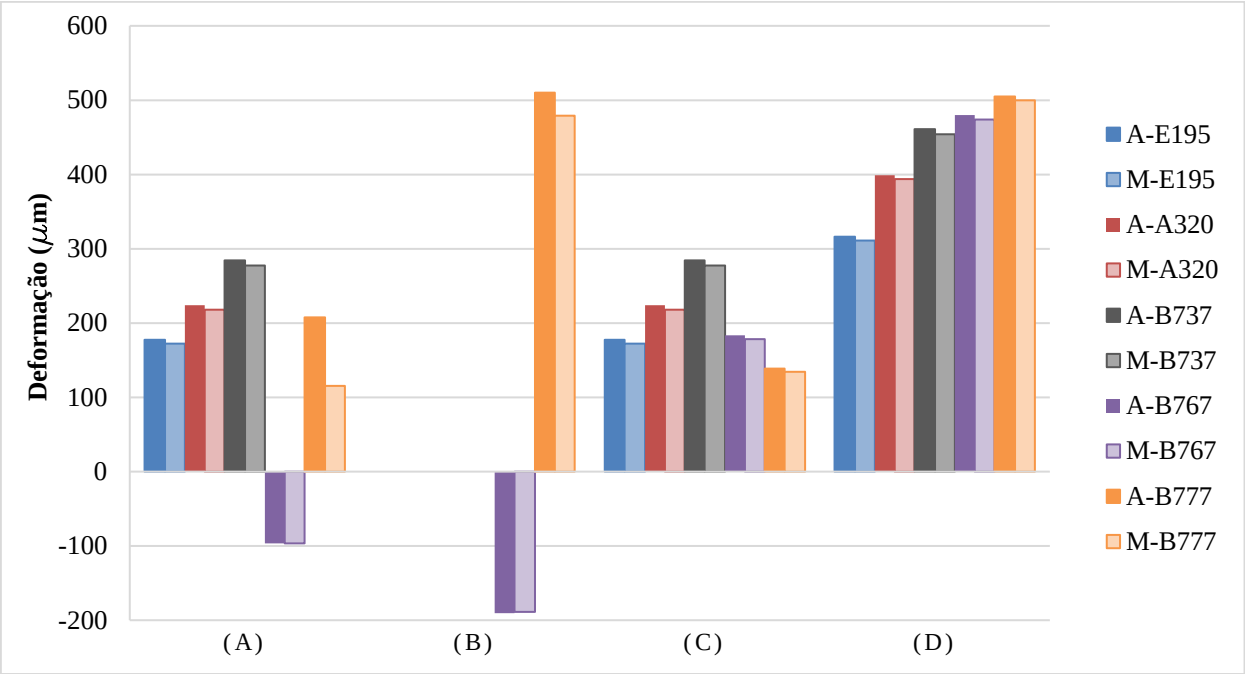


Figura 7 Tensão na Fibra Inferior do Revestimento.

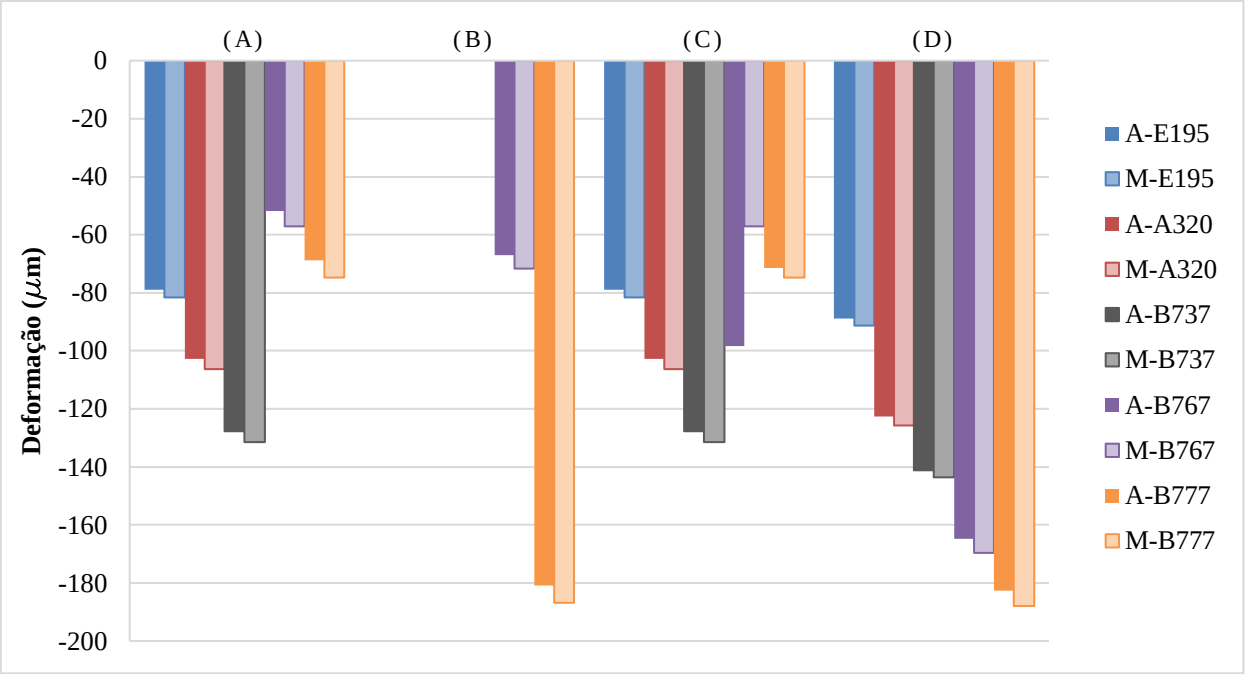


Figura 8 Deformação no Topo do Subleito.

Da Figura 7 observa-se que, com exceção das deformações nas regiões do centro de gravidade e entre rodas em tandem do B767, os valores obtidos foram positivos, somente pelo fato de convenção dos sentidos adotados pelos *softwares*. As maiores deformações foram ocasionadas pelas aeronaves de maior porte somente na região abaixo da roda. Nas regiões do centro de gravidade e entre as rodas, o B737-800 foi a aeronave que resultou nos maiores valores de deformação na fibra inferior do revestimento. Na região entre as rodas tandem, quando analisada a fibra inferior do revestimento, existe uma disparidade ao comparar as duas aeronaves com trem de pouso do tipo tandem, possivelmente devido ao fato do princípio da superposição dos efeitos.

Do gráfico da Figura 8 nota-se que todos os valores de deformações são negativos (convenção dos sentidos dos *softwares*). Outra observação é que, dependendo do local de análise, as aeronaves com maior valor de PMD não produzem as maiores deformações, como no caso analisado na fibra inferior do revestimento.

Ao verificar as deformações no topo do subleito nas regiões do centro de gravidade e entre rodas, a aeronave que ocasiona os maiores valores é o B737-800. Somente na região abaixo da roda as aeronaves de maior PMD geram as maiores deformações.

Ainda sobre as deformações no topo do subleito, ao verificar os dados obtidos pelo AEMC na região entre as rodas, a aeronave B777 resultou em menores valores quando comparada às demais aeronaves. Por sua vez, o B767, quando calculado pelo MePADS foi a aeronave que gerou as menores deformações na região entre as rodas.

A região abaixo da roda foi a que apresentou os maiores valores de deformações quando comparadas às demais regiões no topo do subleito. Assim, ao considerar que dependendo da região de análise não há uma uniformidade de crescimentos das deformações geradas, essa é uma região importante a ser considerada no dimensionamento da estrutura.

Para a fibra inferior do revestimento, constata-se que a região abaixo da roda também é de extrema importância. Com exceção da região entre rodas em tandem, a região abaixo da roda também resultou nos maiores valores de tensão e apresentam uma tendência de crescimento conforme aumenta a carga da aeronave analisada. Considera-se, assim, que a região abaixo da roda garante um dimensionamento que leva em consideração um fator de segurança aceitável em estruturas de pavimentos aeroportuários.

Vale ressaltar que nem sempre o maior PMD gera o maior deslocamento ou tensão na estrutura do pavimento aeroportuário, haja vista que a configuração dos trens de pouso interfere na distribuição do carregamento. Tal fato pode ser importante na etapa de projeto de implantação ou restauração de um pavimento aeroportuário, pois nem sempre a aeronave de projeto selecionada para o dimensionamento, causará maior solicitação, portanto deve-se trabalhar considerando o conjunto de aeronaves em detrimento da aeronave de projeto no que se refere a análise estrutural ou dimensionamento do pavimento aeroportuário.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foram utilizados dois *softwares* (AEMC e MePADS) para a determinação das deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico e no topo do subleito de um pavimento aeroportuário. Foi verificado que os resultados podem ser considerados os mesmos quanto comparados os dois *softwares*, validando o uso do nacional (AEMC) para o cálculo das deformações dessas estruturas.

Foram verificadas cinco aeronaves na análise, considerando uma variedade quanto ao peso máximo de decolagem. Também foram considerados quatro pontos distintos de análise: o centro de gravidade, entre as rodas, abaixo da roda e entre as rodas tandem (somente as duas maiores aeronaves).

No centro de gravidade os menores valores de deformação, tanto na fibra inferior do revestimento, quanto no topo do subleito, foram originados pelas maiores aeronaves analisadas. Na região entre as rodas os menores valores identificados foram calculados a partir da maior aeronave considerada, o B777, tanto na fibra inferior do revestimento quanto no topo do subleito.

Na região abaixo da roda os valores das deformações seguiram a mesma ordem dos PMD das aeronaves: as com menor PMD geraram os menores deslocamentos nessa região, e as de maior PMD causaram as maiores deformações. A pressão dos pneus e as cargas das rodas podem ser as razões pelas quais, nessa região, as maiores aeronaves ocasionam maiores deformações. Na região entre as rodas tandem, onde foram verificados somente o B767 e o B777, os deslocamentos foram maiores com a aplicação de carga da maior aeronave.

Observou-se que nem sempre a aeronave que possui maior PMD, é a que causa maiores deformações nos pontos analisados do pavimento. Para obter estruturas mais ajustadas às solicitações impostas pela movimentação é necessário considerar todas as aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso e pode impactar consideravelmente no dimensionamento do pavimento aeroportuário.

Referências

Bernucci, L. B., Mota, L. M. G., Cerati, J. A. P., & Soares, J. B. (2010) *Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras. Abeda. Rio de Janeiro, RJ.

Durán, J.B.C. (2015). *Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários: Estudo de Caso no Aeroporto Estadual de Araraquara*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo.

FAA. (2005). *Federal Aviation Administration. Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations*. U.S. Department of Transportation.

FAA. (2009). *Federal Aviation Administration. FAARFIELD – User Manual*. U.S. Department of Transportation.

Franco, F. A. C. P., & Motta, L. M. G (2018). *Guia para utilização de Método Mecanístico-Empírico–Apresentação de programas desenvolvidos*. Rio de Janeiro: UFRJ.

Horonjeff, R., McKelvey, F., Sproule, W., & Young, S. (2010). *Planning and design of airports*. New York: McGraw-Hill Companies.

Jaritngam, S.; Somchainuek, O.; Yandell, W. O.; Prachasaree, W.; Thongchim, P. & Taneerananon, P. (2010). *Journal of Society for Transportation and Traffic Studies 1.4*, 51-59.

Kawa, I., Brill, D. R., & Hayhoe, G. F. (2007). FAARFIELD – New FAA Airport Thickness Design Software, in *Proceedings of the 2007 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, New Jersey.

Lima, C.D.A, Motta, L.M.G., Aragão, F.T.S., & Guimarães A.C.R. (2020). Mechanical Characterization of Fine Grained Lateritic Soils for Mechanistic Empirical Flexible Pavement Design. *J Test Eval*;48(1):1–14. https://doi.org/10.1520/JTE20180890.

Rezende, C.W.A. (2018). *Estudo do impacto durante o pouso de aeronaves modernas pesadas em pavimentos flexíveis de pistas de aeroportos*. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, – Curitiba, 2018.

Shabani, S., & Zarei., S. (2017). Assessing the Effect of Wide-Body Aircraft Landing Gear Configuration on the Stresses Acting on the Composite Pavements using Numerical Analysis. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12: 5205-5211. DOI: 10.36478/jeasci.2017.5205.5211.

Vieira, R.A.C. (2015). *Dimensionamentos de Pavimentos Aeroportuários: a consideração de novas orientações. Tese de Doutorado*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Yoder, E.J., &Witczak, M.W. (1975). *Principles of Pavement Engineering Design*. 2nd Edition. John Wiley & Sons. New York.

Unpaved runways surface: what we know and what we need to know

João Virgilio Merighi1, Rita Moura Fortes[1], Junior Menezez Almeida[2], Reynaldo Paes Leme[3]
1 - Federal Institute of São Paulo - IFSP, professor at Postgraduate Airports - Design and Construction & Consultant of Latersolo Engineering, EMBRAER: 2 - Infrastructure Engineer, 3 - Responsible for Building and Industrial Plants

*** E-mail autor correspondente**: jmerighi@latersolo.com.br

PAPER ID: SIT148

ABSTRACT

After the authors' experience in the design, execution, operation of the EMBRAER KC 390 test track in Gavião Peixoto in critical situations and countless moments of reflection upon the project, the need of discussing this topic in a broader way arose.

When we talk about runways as a tool for social integration, the first question we hear is: why not pave? This is very difficult to answer, as it involves several aspects such as scarcity of financial resources in most countries, which according to the World Bank (2022), 10% of the planetary population lives below the poverty line (less than US$ 1,90/day). A track has the role of meeting the need of social integration with the poorest communities, providing medical and social assistance; it also involves the security of countries, where the armed forces must have access to the most remote places and the rescue caused by cataclysms in any way anyway. It is not to be thought that an airfield is intended only to meet the demands of business or tourism.

Therefore, the Planet needs and will always need many unpaved airfields.

This paper presents some studies and technical standards available in the literature on this technology and presents the existing unanswered questions necessary to meet the engineering project requirements, which needs to guarantee useful lifetime, operation risk and a maintenance matrix containing the number of operations and technologies available on site. Along with these uncertainties, what possible researches to be carried out in a scenario of financial scarcity are also discussed.

The divergences and uncertainties arise from the lack of knowledge of both the geotechnics of tropical soils from the international society and the support capacity and plastic deformation of the soil and even loose coarse aggregates, passing through the longitudinal and transversal irregularities

Keywords: Unpaved Runways, Design, Execution, Operation, Tropical soils.

1 INTRODUTION

Brazil is a country of continental dimensions, with approximately 3.5 million km^2 in the Amazon region alone. Thus, in a region with a very low population concentration and a large portion of this population, concentrated in small villages on the banks of rivers that become unsuitable for navigation for up to six months, in the dry season, social integration without airports becomes difficult.

However, the cost of paving a runway (RW), associated with the operation of transporting materials that can reach a 2-thousand-km distance and take at least 2 months by boat and road, can make the choice to use this solution.

On the other hand, it has been observed in the international scenario, countries such as Canada and Australia developing procedures that can enable the operation of not only of small, but also medium-sized aircraft on unpaved runways.

In this scenario, this paper aims to show some procedures already established in the airport environment and to bring to light the needs of Brazil and the entire Amazon region, which in the authors' opinion, given the biodiversity/climate/geotechnics, it ranges from covering Guatemala up to close to Brasília, in terms of latitude.

Finally, it is important to point out that the use of surface mine haulage roads, as there is a world-wide experience in this subject, has been considered. Thus, throughout this paper, it will be presented, in terms of literature, some solutions to obtain already established design parameters and themes that need further study of its concepts.

2 TYPICAL STRUCTURE FOR AIRFIELD UNPAVED PAVEMENT

In terms of the typical structure of an unpaved pavement, it can be simply explained as: there are the three basic layers of a flexible structure, namely: subgrade, base and wearing course.

Figure 1 shows typical layers of an unpaved pavement structure in which the cladding and base layers minimize the vertical pressure on the subgrade, minimizing its permanent deformation (Légère, 2015) .

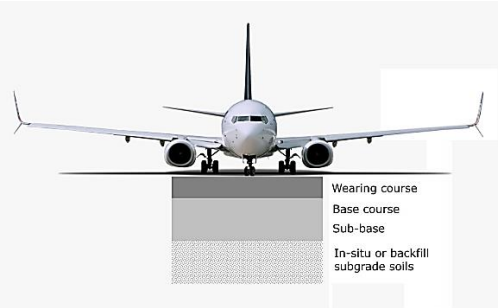


Figure 1 Typical unpaved pavement structure

3 PAVEMENT DESIGN: THICKNESS OF STRUCTURE

One of the most widely used methods to obtain structure determination of surface mine haulage roads is using the curved referred to as CBR (California Bearing Ratio) curves. This method was originally developed in 1942 and continues to be used by designers of roads in mines, particularly in Brazil, for example, in VALE Company and Anglo-American Company.

Figure 2 presents the subbase thickness requirements curves in function of a wide range of CBR subgrade. It should be noted that, according to Kaufman and Ault (1977), the thickness calculation is a function of the load on 1 wheel.

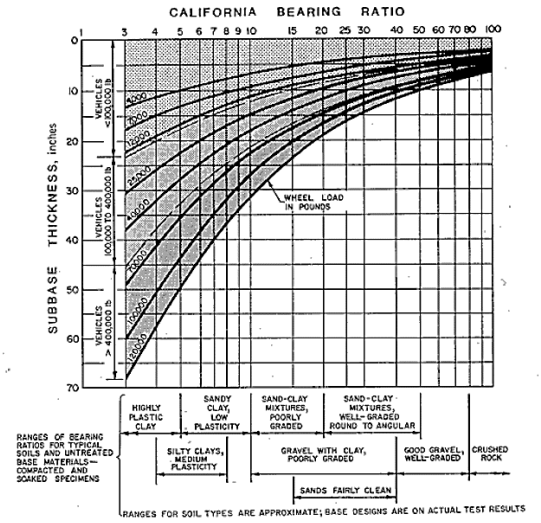


Figure 2 Subbase thickness versus subgrade CBR (Kaufman, Ault, 1977)

It is very important to observe that in figure 2, the wheel load is only for one tire.

According to the document Operational Life of Airport Pavements DOT/FAA/AR-04/46, since 1942 design curves have been proposed using the single-wheel criterion and were developed for 7,000- and 12,000-lb wheel. There has been evolution over the years and, since the document AC 150/5320-6F Airport Pavement Design and Evaluation, 2012, the total thickness "t" of the structure in the Pavement Design, using the CBR equation, is for C = coverages ≤ 5,000.

It is important to note that there is multiple-wheel heavy gear load (MWHGL) in these equations

The α-factor was used in the second equation to adjust thickness "t" for over than 5,000 coverages.

$$\frac{t}{\sqrt{A}} = -0.0481 - 1.1562\left[Log\frac{\overline{CBR}}{p}\right] - 0.6414\left[Log\frac{\overline{CBR}}{p}\right]^2 - 0.4730\left[Log\frac{\overline{CBR}}{p}\right]^3 \quad (1)$$

$$\frac{t}{\sqrt{A}} = \alpha\left\{-0.0481 - 1.1562\left[Log\frac{\overline{CBR}}{p}\right] - 0.6414\left[Log\frac{\overline{CBR}}{p}\right]^2 - 0.4730\left[Log\frac{\overline{CBR}}{p}\right]^3\right\} \quad (2)$$

Thus, in terms of calculating the pavement total thickness "t", using the equations that consider the value of the subgrade CBR, the total thickness of granular material necessary to protect the subgrade from permanent deformation is also calculated.

The design procedures presented in the FAA document (AC 150/5320-6G) are based on the Waterways Experiment Station WES criteria, the CBR value and thickness of the structure as described above. Large scale test data and pavement observations in service performed at WES, generated the document Multiple-Wheel Heavy Gear Load Pavement Test, volume 1, Basic Report, with credits to Kaufman, Ault (1977) which served as the basis for transforming the effect of a wheel into multiple-wheel heavy gear load (MWHGL), used in the FAARFIELD software up to the current version 2.0.

In conclusion, the existing formulation for the determination of the granular thickness of a pavement structure aiming to protect the subgrade layer, according to documents used in the Surface Mine Haulage Roads projects, are based on the mechanical strength expressed in CBR value but still, they are based on the wheel load.

In order to protect the subgrade, the FAA model for calculating the thickness of a granular layer, meeting this premise. In the case of ESWL, is based on the mechanical strength expressed in CBR value, and the adjustment for Multiple-Wheel (MWHGL) criterion, must be carried out, considering the studies of the work by Alvin et all in the formulation on page (69/219), therefore considering the effect of deflection for one wheel and several wheels.

4 THE USE OF MCT METHODOLOGY FOR RAPID CLASSIFICATION OF SOILS

The construction of pavement structures and the reinforcement of subgrade soils must be preceded by accurate characterization of pavement materials and soils. The behavior of soils can vary from point to point, even if the soils have the same genetic origin. The drainage condition of the subsoil can modify the characteristics of its mechanical behavior (Fortes, 1990).

Thus, the success in the use of soils as a construction material requires a vast number of laboratory tests, time, and adequate financial resources. These factors and low costs associated with abundantly available soil deposits, allow the designers to optimize the management of highway construction projects.

A rapid methodology for classifying soils in accordance with the MCT (Miniature, Compacted, Tropical classification) is described to fill the gap in geotechnical investigation of soils used for road construction (Fortes, 1990; Fortes, 1997; Fortes, Merighi, 2003).

The MCT classification can be used for all kind of soils. Considerable time and cost savings are achieved by implementing the rapid disk method of the MCT classification to characterize soils.

The method is based on the fabrication of small disks of soil (20-mm diameter) that are molded in stainless steel rings and dried. After drying, the diametrical contraction of the inserts cast in stainless steel rings is measured. Then the inserts are submitted to a sorptivity

test, which makes it possible to see cracking, expansion activity, and resistance to the penetration of a standard needle. A mini penetrometer is used to determine the shrinkage and consistency after soaking dried specimens in water (Fortes, Merighi, 2003).

In 1997, Fortes presented a proposal to standardize this rapid disk procedure at the First Permanent Chamber of Occurred Technological Development conference at the Presbyterian University of Mackenzie.

The advantage of using the rapid disk method of the MCT classification is that it is possible to observe and estimate the behavior of the soil, as a structure, in the face of weathering. Table 1 presents the Properties and relative desirability in transportation applications based on MCT soil classification groups (Nogami, Villibor, 1995).

Table 1. Properties and relative desirability in transportation applications based on MCT soil classification groups

BEHAVIOR		N = NON-LATERITIC				L = LATERITIC		
MCT GROUP		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
PROPERTIES (1)	MINI-CBR NOT SOAKED	M, H	H	M, H	H	H	V, H	H
	MINI-CBR SOAKED	M, H	M, H	L, M	L	H	H	H
V = VERY HIGH H = HIGH M = MEDIUM L = LOW	EXPANSION	L	L	H	M, H	L	L	L
	SHRINKAGE	L	L, M	M	M, H	L	L, M	M, H
	PERMEABILITY (K)	M, H	L	L, M	L, M	L, M	L	L
	SORPTIVITY (s)	H	L, M	H	M, H	L	L	L
RELATIVE DESIRABILITY AS: ½ = NOT SUITABLE	PAVEMENT BASE	N	4th	n	n	2nd	1st	3rd
	SELECT SUBGRADE	4th	5th	n	n	2nd	1st	3rd
	COMPACTED SUBGRADE	4th	5th	7th	6th	2nd	1st	3rd
	EMBANKMENT (CORE)	4th	5th	6th	7th	2nd	1st	3rd
	EMBANKMENT (SHELL)	N	3rd	n	n	n	2nd	1st
	EARTH ROAD SURFACING	5th	3rd	n	n	4th	1st	2nd
CLASSIFICATION OBTAINED FROM TRADITIONAL INDEX PROPERTIES	USCS/ASTM	SP SM	SM SC ML	SM, CL ML MH	MH CH	SP SC	SC	MH ML CH
	AASHTO	A-2	A-2 A-4 A-7	A-4 A-5 A-7	A-6 A-7-5 A-7-6	A-2	A-2 A-4	A-6 A-7-5

(1) Specimens compacted near the maximum dry density and optimum moisture using standard compaction effort

c) Resist permanent deformation either longitudinally (translated by the IRI value) or transversally, which informs the existence of grooves and possible hydroplaning points) (Merighi, Uddin, 2014)

The items a) and c) can be summarized in the figure 3 that presents the minimum requirement to meet the requesting efforts.

If the pavement surface does not withstand the vertical loads, permanent deformation or rutting or a narrow depression relative to the original surface occurs. Subsequently, the loads progressively cause rutting to the base and finally to the subgrade surface.

The ruts allow water to accumulate on the surface pavement which can generate hydroplaning and cause water to soak into the pavement, promoting rapid pavement deterioration.

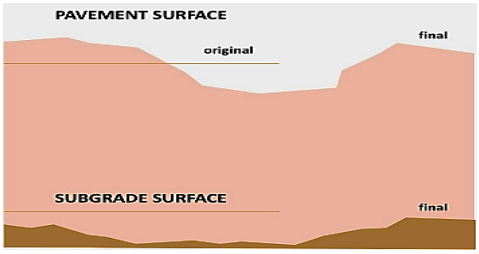


Figure 3 The minimum requirement to meet the requesting efforts (Dawson and Kolisoja, 2017)

5 SURFACE LAYER

The methods are based upon theoretical analysis, empirical design procedures, observed performance, and field and laboratory tests. The theoretical analysis is a function of the ultimate bearing capacity of the existing soils and the load applied to the compacted base material.

The Surfacing layer or wearing course is a very important layer in the unpaved pavement's structure.

However, it is a layer that must attend the following demands:

a) The load support.
b) Rain effect, therefore, it must be resistant to erosion and does not lose its bearing capacity.

Strong compaction can minimize the amount of rutting.

The document Dawson and Kolisoja divides into four fundamental types of mechanisms where rutting can occur.

The main cases will be presented:

a) The good compaction – low surface rutting

According these authors. good compaction minimizes the amount of rutting observed.

In the following two figures, extracted from the cited reference, there is a summary of the statement "good compaction" for reducing rutting or low rutting only in the surface layer.

This concept applies to mine roads but not to airfield pavement. Airfield pavement must have zero permanent deformation.

Figure 4 extracted from Dawson and Kolisoja shows number of load cycles versus permanent strains for a good compaction.

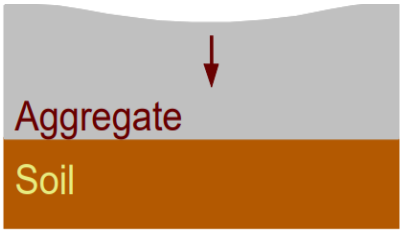


Figure 2.4. Mode 0 Rutting - compaction of

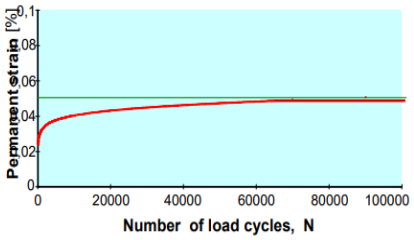


Figure 2.5. Permanent strain development for a crushed granodiorite

Figure 4 Number of load cycles versus permanent strains for a good compaction (Dawson and Kolisoja, 2017)

b) Rutting in pavement surface

The second distress type or superficial rutting occurs due to inadequate shear strength in the first layer.

Figure 5 shows rutting shear deformation within the base layers of the pavement, near the surface.



Figure 5 Rutting Shear deformation within the base layers of the pavement, near the surface. (Adapted from Dawson and Kolisoja, 2017).

c) Generalized rutting

Shear deformation within the subgrade with the surface and base layer following the subgrade.

Figure 6 presents generalized rutting in the structure pavement (Adapted from Dawson and Kolisoja).

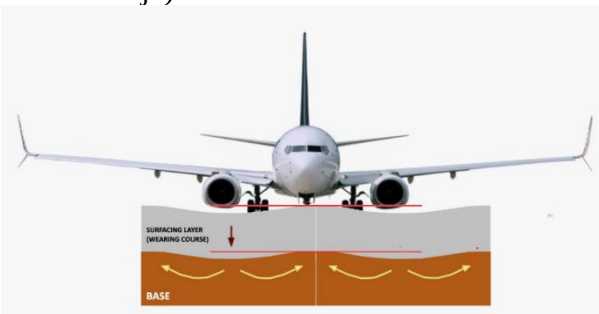


Figure 6 Generalized rutting in the structure pavement. (Adapted from Dawson and Kolisoja, 2017)

In summary, it is clear that the rupture or rutting occurs after layers not presenting good shear strength, inadequate/low shear strength or low shear deformation resistance

In the literature consulted on unpaved pavement, the recommendation of shear test for the layers of the unpaved pavement structure was not evidenced, considering that the rupture of the layers occurs by shear.

6 COMMENTS

There is no doubt that unpaved pavement is a necessary solution not only to meet the cost reduction requirement, but also to allow the construction of aerodromes in the most remote regions of the planet and with scarcity of materials and means of transport.

It is understood that for the Amazon region, rich in laterite concretions and “ore yoke”, it is possible to meet the demand for shear strength.

7 CONCLUSIONS

1. Simultaneously using the documents Operational Life of Airport Pavements DOT/FAA/AR-04/46 and Multiple-W printwheel Heavy Gear Load Pavement Test, volume 1, Basic Report of Kaufma and Ault (1977), it is possible to calculate the total thickness of a pavement structure considering a layer.

2. The MCT methodology allows, in a very simple way, the predictability of the behavior of the fine material (fine material of

granular layers) in relation to the performance in terms of expansion, contraction and erodibility.

3. Triaxial tests simulating field conditions, it is possible to verify if the material supports the shear stresses obtained from calculations obtained through classical theory of pavement mechanics or through software for mechanistic analysis.

4. There is an urgent need to develop laboratory tests to evaluate the resistance to permanent deformation.

5. There is a need for test tracks to assess existing unpaved pavement finishing technologies today for unevenness.

References

Dawson, A., Kolisoja, P. (2017) *Managing Rutting in Low Volume Roads*. EXECUTIVE SUMMARY July 2006. Nottingham Centre for Pavement and Tampere University of Technology

Department of Agriculture (2017). *Earth and Aggregate Surfacing Design Guide*, Agricultural Engineering Technical Note No. Aen-4, United State, August.

Fortes, R.M. *Método Expedito de Identificação MCT de Solos Tropicais, para Finalidades Rodoviárias, Utilizando-se Anéis de PVC Rígido*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1990, 210p.

Fortes, R.M. (1997) *Método das Pastilhas para Identificação Expedita do Grupo MCT – Miniatura, Compactada, Tropical*. 1ª Câmara Permanente de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil.

Fortes, R. M. & Merighi, J. V. *The use of MCT methodology for rapid classification of tropical soils in Brazil*. IJP - International Journal of Pavements, ISSN 1676-2797, Vol.2, No.3, September 2003, pp.1-13.

Kaufman, W; Ault, J. C. (1977) *Information Circular 8758 Design of Surface Mine Haulage Roads - A Manual,* United States Department of the Interior Cecil D. Andrus, Secretary Bureau of Mines.

Légère, G. (2015) *Pavement Design Of Unpaved Roadways C-Tep*. (Center For Transportation Engineering & Planning) Annual Pavement Workshop February 3, 2015, Calgary, Alta.

Merighi, J.V.; Uddin, W. 2014. *Study of Water Pools on Runways Considering the ICAO and Brazilian Civil Aviation Agency* (Recommendations for Large Aircraft), FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference

Nogami, J.S. e Villibor, D.F. (1995) "*Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*". São Paulo: Villibor, Brasil.

Thompson R. J.; Visser A. T. (1999) *Designing And Managing Unpaved Opencast Mine Haul Roads For Optimum Performance* Univ. Of Pretoria Pretoria, South Africa, Sme Annual Meeting March 1-3, 1999, Denver, Colorado

ASSESSMENT OF AIRCRAFT EMISSIONS DURING LANDING AND TAKE-OFF (LTO) CYCLES AT GALEÃO INTERNATIONAL AIRPORT, RIO DE JANEIRO

Jonathan Gabriel de Oliveira Pinheiro[1]; Marcelino Aurelio Vieira da Silva [2]; Elton Fernandes [3]

*** Corresponding author e-mail address**: jonathanjgop@pet.coppe.ufrj.br

PAPER ID: SIT135

ABSTRACT

Recent studies of environmental sustainability in civil aviation show specific interest in the impacts of atmospheric pollutant emissions from the landing and take-off cycles of aircraft (LTO) near airports. These impacts are more worrisome at airports surrounded by a dense urban occupation. Although international entities already have methodologies for evaluating emissions, there is a need to expand the case studies to different regions of the world to discuss the various factors that influence pollutant emissions and to define the best actions to mitigate unwanted effects in each case. Traffic intensity, aircraft mix, operational efficiency and weather are among the important elements to consider. The Brazilian case is quite critical, since most of its large airports are in dense urban networks, which implies a significant population being affected by civil aviation activity. This paper estimates the emissions of LTO cycles in an airport of great relevance in the Brazilian scenario and discusses the results in face of its causative elements, comparing them with the results of studies from other airports around the world. Results show relevant aspects to be considered in actions to mitigate the effects of emissions from LTO cycles and research gaps in the literature.

Keywords: Airports; Aviation emissions; Sustainability; LTO cycle; Nitrogen oxides; Particulate material.

ACKNOWLEGDEMENTS

We would like to thank the *Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Galeão* (DTCEA-GL) for Support this study.

[1] Transport Engineering Research, Transport Engineering Department, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil. Email: jonathanjgop@pet.coppe.ufrj.br

[2] Assistant Professor, Transport Engineering Department, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil. Email:marcelino@pet.coppe.ufrj.br

[3] Assistant Professor, Transport Engineering Department, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil. Email: elton@pet.coppe.ufrj.br

1. INTRODUCTION

With the expansion of the economy, air transportation has become increasingly important for Brazil's commercial operations, and air traffic has expanded steadily over the previous two decades. Aviation has shown rising demand and above-average market growth, with an annual rate of nearly 5%, indicating that the sector's contribution to air pollution is always increasing, which can have negative consequences on the health of system users and those present in neighboring areas. Recent research has focused on the study of emissions during the landing and takeoff cycle (LTO), which occurs in urbanized areas and emits multiple pollutants such as nitrogen oxides, hydrocarbons, sulfur oxides, and particulate matter (Sabatier et al., 2021; Yim et al., 2015; Mazaheri et al., 2011). Many studies have demonstrated that air pollutants emitted by a big airport may have an impact on air quality around the airport and even throughout the region (Centracchio et al., 2018; Henkes & Pádua, 2017; Masiol & Harrison, 2014; Schürmann et al., 2007). As a result, the environmental effect of airport emissions remains a key problem to address for air quality control.

There is evidence that airports' presence in urban residential areas increases the incidence of health problems or exacerbates pre-existing diseases owing to exposure to several air contaminants (Fajersztajn et al., 2019; Heal et al., 2012; Raper et al., 1970). Because most large airports are located near densely populated metropolitan agglomerations, their LTO cycles have the potential to have a substantial influence on the environment and health of those who live nearby (Masiol & Harrison, 2014). It is generally known that most Brazilian airports are in this condition, placed in the urban environment, near major city marketplaces, as is the case with the international airport of Galeão in Rio de Janeiro (SBGL). Described as a high-traffic airport and one of the most important in all of Brazil.

One of the fundamental and successful steps for assessing pollution, simulating the environment, and developing pollution management plans for cities is the creation of pollutant emission inventories (Fan et al., 2012). Although several studies have been conducted to quantify and analyze airport emissions, most of them evaluate only one or a small group of engines as an emission source and do not address the quantities of particulate matter (PM) emitted because they are not available and are not listed in the ICAO database. Furthermore, there is a severe labor shortage in the Brazilian context. This research provides the consideration of the elements that lead to pollution emissions from LTO cycles, as well as the identification of potential airport activity hotspots. To that end, the goal of this study is to quantify the HC, CO, NO_x, SO_x, and PM emissions caused by aircraft movement at Galeão International Airport. Through analyzing the LTO cycles for a year (2019), it will be possible to verify the pollutant concentrations and the marginal contribution of aviation to air quality, supporting the determination of mitigating actions for the sources generating the emissions.

The article is organized into topics, following this introduction, which sets the background of the study and its aims, if it presents topic 2 with a review of selected studies. Topic 3 demonstrates the analytical methods and data used to achieve the study's objectives. Topic 4 presents the findings, including a discussion of the variables that cause emissions and strategies to limit their effects. Topic 5 highlights the study's findings and recommendations.

2. LITERATURE REVIEW

Several studies have been done to analyze the emissions of LTO cycles and their possible consequences on local air quality in response to the increased concern about exposure to pollutants from aircraft movements at airports. Airport activities, according to authors Hudda et al. (2020), Shirmohammadi et al. (2018), Masiol and Harrison (2014), Hsu et al. (2013), Dodson et al. (2009) and Schürmann et al. (2007), contribute considerably to pollution and decrease of local air quality and in nearby communities. During a market assessment in Brazil, it was discovered that cities have suffered from increasing soil and air pollution, as well as noise pollution, as a result of increased airport operations and intensified car traffic near the airport (Henkes & Pádua, 2017).

The activities at Warwick Airport led to a rise in pollutant concentrations in five separate areas ranging from 160 meters to 3.7 km from the

airport. For this investigation, models, and regression, as well as operational monitoring, were employed to correlate high levels of pollutant concentration, particularly particulate matter, to LTO cycle modes. According to the investigations, proximity to residential areas necessitates tougher concentration controls and investigations to describe and establish the potential effects on the health of individuals living nearby. (Dodson et al., 2009; Hsu et al., 2012; Hsu et al., 2013)

Sabatier et al. (2021) discovered, on a bigger scale, airport-related emissions lead to NO_2 levels rising throughout several square kilometers. The size of the areas impacted by the plume is very sensitive to traffic activity and rises at a pace that exceeds the rate of activity increase. Tokuslu (2020) used emission parameters from the ICAO engine emission database to estimate aircraft air pollution (HC, CO, NO_x) during LTO cycles at Georgia's Tbilisi International Airport. According to the calculation, a 2-minute reduction in taxiing time can result in a 5% reduction in LTO cycle emissions. Furthermore, it was shown that a 50% increase in LTO cycles at the airport might result in between 55% and 60% greater emissions and the continuation of deteriorating local air quality. Vujović and Todorović (2017) examined several pollutants emitted by aviation traffic at Nikola Tesla Airport in Belgrade using LTO cycle statistics from 2008 to 2015. According to the study, as the number of LTO cycles increased, so did local air pollution.

Considering the significance of LTO cycle research, when exhaust gases generated near airports affect directly or indirectly human health and ecosystems, these investigations raise awareness of the level of environmental pollution among those affected. According to the literature analysis, the consequences of LTO cycles may be evaluated using local atmospheric conditions and the efficiency of techniques used during LTO cycles. Otherwise, the aircraft mix at the airport will have an impact on emissions. According to this assessment, there will be numerous stakeholders at the airport who may help to mitigate the detrimental impacts of pollution emissions on LTO cycles at airports. As a result, the effort of this study will be limited to analyzing operational alternatives that might increase productivity and providing short-term solutions to minimize the environmental problems produced by airport activities.

3. DATA AND ANALYTIC METHODS

Figure 1 depicts a typical LTO cycle according to the ICAO (2016) definition. The taxi/idle, approach, climb-out, and take-off modes comprise the LTO cycle. Climb, descent, and cruise modes are not available in this instance.

Time in mode (***TIM***), fuel flows, and engine emission indices (***EI***) will be utilized in the calculations. ***TIM*** is the amount of time an aircraft engine spends in one of the LTO cycle modes of operation, stated in minutes. The ***EI*** is the amount of a certain pollutant released per unit mass of fuel consumed in a specific engine. Thus, by multiplying the flight mode-specific ***EI*** by the ***TIM*** fuel flow, a mode emission rate in grams of pollutant per LTO cycle is generated (ICAO, 2016). The data is accessible at four standard operating points, which are as follows: idle (7% of maximum thrust), approach and landing (30 %), climb-out (85%), and takeoff (100%). Figure 1 illustrates a typical LTO cycle. It should be noted that the relative distances between where the final approach begins and where the climb-out stage concludes are defined by the airport's instrument approach and take-off procedures.

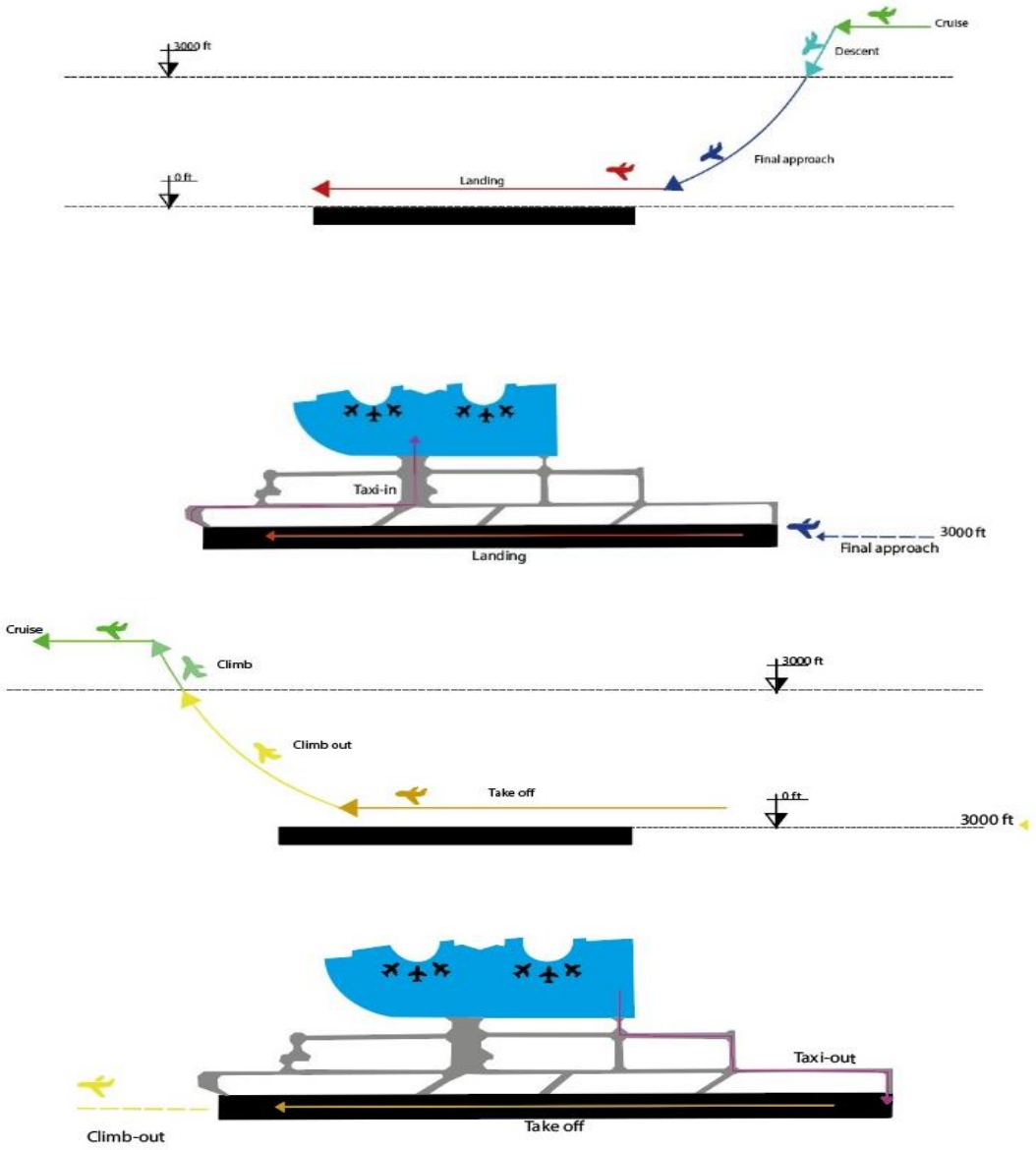


Figure 1 Demonstration of representative Landing and Take-Off (LTO) phases

3.1. Calculation Method

The LTO cycle methodology (ICAO, 2016) is used to calculate hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO), and nitrogen oxide (NO_x) emissions from aircraft operations near airports below 3000 feet in altitude (915 m). Emissions are determined by the time in mode (***TIM***), the emission index (***EI***), and the engine fuel flow (***FF***) (ICAO, 2020). Furthermore, information about the kind of aircraft and engine is considered. Equation 1 calculates the total emissions of a pollutant *i* released by an aircraft *j* during an LTO (g) cycle, $\boldsymbol{E_{ij}}$.

$$E_{ijk} = \sum(TIM_{jk} \times 60)(FF_{jk}/1000) \times EI_{jk} \times NE_j \quad (1)$$

Where:

$\boldsymbol{E_{ijk}}$ is the pollutant *i* emission index (in grams per kilogram of fuel) in mode *k* (takeoff, climb, taxi/idle, and approach) for each engine used in an aircraft *j*. The time in mode *k* (in minutes) for aircraft *j* is represented by $\boldsymbol{TIM_{jk}}$. $\boldsymbol{FF_{jk}}$ is the mode k fuel flow (in kilograms of fuel per second - kg s^{-1}) for each engine in an aircraft *j*. The emission index for each engine of aircraft *j* in operating mode *k* is given by $\boldsymbol{EI_{jk}}$. The number of engines utilized in aircraft *j* is denoted by $\boldsymbol{NE_j}$. The NO_x, CO, and HC calculation approach is divided into two parts. First, the type of aircraft is determined. The emissions

(pollutant mass) may then be computed using equation 1 using the ICAO database for aircraft engines.

Since there is no standard definition for the evaluation of emissions required by ICAO, the model of the System for Assessment of Global Aviation Emissions (SAGE) stipulated by the Federal Aviation Administration Agency (FAA, 2005) was used to calculate SO_x. In SAGE, the amount of sulfur oxides released is proportional to the amount of sulfur in the fuel, which is specified as 0.8 g/kg. It is expected that all of the sulfur (S) present is transformed into SO_2 throughout the combustion process. The total SO_x emission for aircraft *j* for an LTO cycle in grams ($\boldsymbol{E_j}$) is then computed using equation 2.

$$\mathrm{E_j} = \sum\left(\mathrm{TIM_{jk}} \times 60\right) \times \mathrm{ER_{jk}} \times \mathrm{NE_j} \qquad (2)$$

Where:

$\boldsymbol{TIM_{jk}}$ is the time in mode *k* (in minutes) for aircraft *j*. $\boldsymbol{ER_{jk}}$ is the total SO_x emission rate per second by mode *k* (gs^{-1}) for aircraft *j* ($\boldsymbol{ER_j = 1 \times FF_{jk}}$). $\boldsymbol{FF_{jk}}$ is the fuel consumption per mode *k* (in kilograms of fuel per second - kg s^{-1}) for each engine of aircraft *j*.

3.2. Particulate Matter Assessment (PM)

The smoke number ($\boldsymbol{SN}$) is used in part to calculate the particulate matter released in LTO cycles. The $\boldsymbol{SN}$ is calculated from the loss of reflectance of a smoke particle filter, and its values are stored in the ICAO database for aircraft engines (ICAO, 2021). Wayson et al. (2009)'s First Order Approximation (FOA-3.0) approach was also used. Volatile PM ($\boldsymbol{PM_{vol}}$) and non-volatile PM ($\boldsymbol{PM_{nvol}}$) may be calculated, where $\boldsymbol{PM_{nvol}}$ is regarded as soot owing to its high black carbon content, while $\boldsymbol{PM_{vol}}$ is the consequence of the interaction of secondary pollutants such as sulfates (Wayson et al., 2009).

$\boldsymbol{PM_{vol}}$ is estimated using two indices: one based on sulfur content and the other on organic chemical interactions with vapor pressure. Equations 3 and 4 are used to calculate these indices.

$$\mathrm{EI_{vol-FSC}(mg/kg)} = 3 \times 10^6 \times \mathrm{FSC} \times \varepsilon \qquad (3)$$

$$\mathrm{EI_{vol-fuel-organic}(mg/kg)} = \delta \times \mathrm{EI_{HCj}} \qquad (4)$$

Where:

$\boldsymbol{EI_{vol-FSC}}$ is the emission index for $\boldsymbol{PM_{vol}}$ of the sulfur content of the fuel ($\boldsymbol{FSC}$). $\boldsymbol{FSC}$ is the ratio between the mass and the standard value of 0.00068. $\boldsymbol{\varepsilon}$ is the fractional conversion of sulfur into its elemental form (S^{IV}) into sulfuric acid (H_2SO_4: S^{IV}) (used to approximate the process of multiple immediate chemical reactions), with a standard value of 0.033. $\boldsymbol{EI_{vol-fuel-organic}}$ is the emission of $\boldsymbol{PM_{vol}}$ from organic fuel (in milligrams per kilogram of fuel). $\boldsymbol{\delta}$ is the mode-dependent factor, with values determined in Table 1. $\boldsymbol{EI_{HCj}}$ is the HC emission index for aircraft engine *j*, established according to the ICAO database.

$\boldsymbol{PM_{vol}}$ is the product of the outputs of equations 3 and 4, multiplied by TIM and fuel flow. The $\boldsymbol{\delta}$ values by LTO cycle mode given by Wayson et al. (2009) for the FOA-3.0 approach are shown in Table 1.

Table 1 $\boldsymbol{\delta}$ values

Mode	$\boldsymbol{\delta}$
Take-off	115
Climb Out	76
Approach	56,25
Taxi/Idle	6,17

Considering $\boldsymbol{PM_{nvol}}$ correlates with $\boldsymbol{SN}$, a concentration index ($\boldsymbol{CI}$), which is the mass of $\boldsymbol{PM_{nvol}}$ per standard exhaust volume, and a volumetric flow rate of core exhaust per kilogram of combustible ($\boldsymbol{Q_{core}}$), based on the air-fuel mass ratio ($\boldsymbol{AFR}$) and the molar amounts of the chemical reaction oxidation of fuel combustion, are used to evaluate PMnvol emissions. Equations 5 and 6 demonstrate how to calculate $\boldsymbol{CI}$ and $\boldsymbol{Q_{core}}$.

$$\mathrm{CI(mg\,m^{-3})} = 0{,}0694 \times \mathrm{SN}^{1{,}24} \qquad (5)$$

$$\mathrm{Q_{core}\left(m^3 kg_{fuel}^{-1}\right)} = 0{,}776 \times \mathrm{AFR} + 0{,}877 \qquad (6)$$

The $\boldsymbol{AFR}$ varies by the engine and for the different power settings used in LTO cycle modes. The FOA-3.0 assumes mean $\boldsymbol{AFR}$ values for all engines as shown in Table 2. The total $\boldsymbol{PM_{nvol}}$ is obtained by multiplying the $\boldsymbol{CI}$ and $\boldsymbol{Q_{core}}$ by $\boldsymbol{TIM}$ and fuel flow. Table 2 shows the AFR values suggested by Wayson et al. (2009)

for different power configurations in FOA-3.0. The $\boldsymbol{AFR}$ fluctuates depending on the engine and the power settings employed in LTO cycle modes. As indicated in Table 2, the FOA-3.0 assumes mean $\boldsymbol{AFR}$ values for all engines. Total $\boldsymbol{PM_{nvol}}$ is calculated by multiplying $\boldsymbol{CI}$ and $\boldsymbol{Q_{core}}$ by $\boldsymbol{TIM}$ and fuel flow. Table 2 displays the $\boldsymbol{AFR}$ values recommended by Wayson et al. (2009) for different power settings in FOA-3.0.

Table 2 AFR values by power setting

Power Setting	*AFR*
100% (Take-off)	45
85% (Climb Out)	51
30% (Approach)	83
7% (Taxi/Idle)	106

The overall amount of PM released throughout the LTO cycle is the total of $\boldsymbol{PM_{vo}}$ and $\boldsymbol{PM_{nvol}}$.

3.3. Research Area

The Tom Jobim International Airport, also known as Galeão International Airport (SBGL) is the second-largest Brazilian airport in terms of international traffic and the sixth-largest in terms of total traffic, with commercial aviation accounting for 88 percent of total traffic in 2019 (CGNA, 2019). According to Riogaleão (2021), the airport's operator, more than 13.5 million passengers moved in 2019, in addition to local and international flights.

Figure 2 shows the location of the SBGL and a 10 km marker around it, a possible area of perception of the pollutants generated in the airport LTO cycles The Santos Dumont airport, one of the busiest in the country, is located within the boundaries of this neighborhood. There is a large region between the two airports that will be hit by both, as well as an intersection of a direct action of the two aerodromes. Within the area of 10 km around the airport, there is one of the largest oil refineries in Brazil, the University city with its technological park, the entire Port region of Rio de Janeiro, the yellow and red lines and the avenue Brazil, highways, and highways Presidente Dutra (the country's most important highway) and Washington Luís. So, because the airport's contribution is driven by the vast activity of the city surrounding it, its activity becomes a latent danger to air quality as traffic grows and the form of airport operation changes.

The study analyzes all LTO cycles of 2019, including those referring to alternative flights for domestic and international traffic, without distinction. For the assessment, movements of military aircraft and traffic crossing over the field accounted for in the airport balance sheet were excluded, in addition to the others in visual flight rules. In this way, HC, CO, NO_x, SO_x, and PM emissions were calculated from 62 airlines that operated at the airport in question during 2019. ANAC (2021) open database was used to consult the number of flights performed, scheduled airlines, type of aircraft, among others.

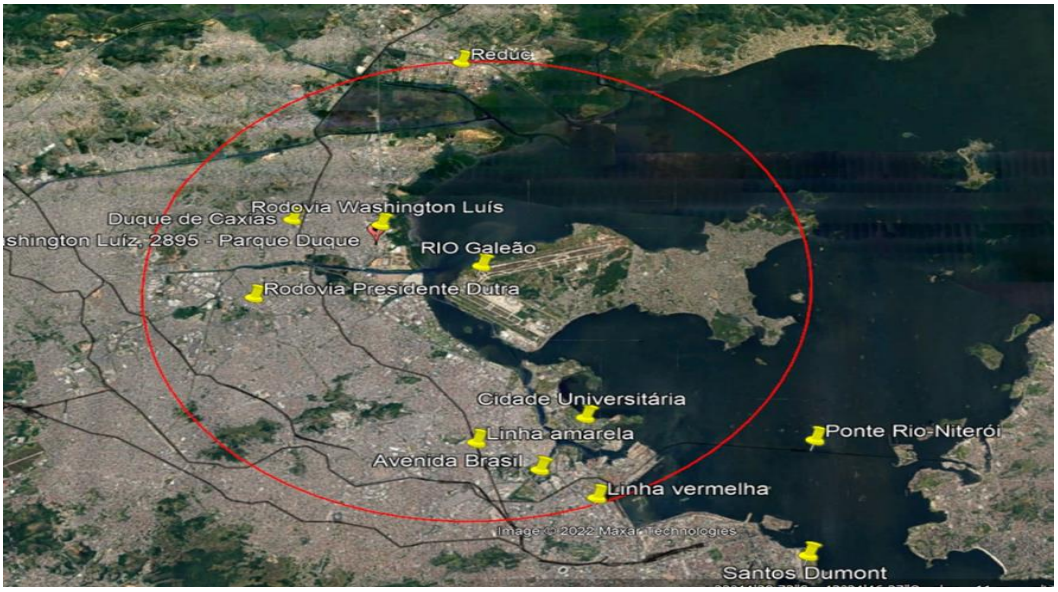


Figure 2 Geographic Location of SBGL. Source: Google Earth, 2022

3.4. Aircraft/engine Combinations

For the analysis, the most typical combinations were chosen according to information from aircraft manufacturers and the ICAO Emissions Database (ICAO, 2021). Since aircraft of a specific type can be equipped with different engine types for the same carrier, such simplification is essential as detailed aircraft/engine information is difficult to obtain. The combinations used for the calculation are listed in Table 3.

Table 3 Typical aircraft/engine combinations

ACFT type	*Engine type*	*ACFT type*	*Engine type*
A300-2	CF6-80C2A5	*B738*	CFM56-7B27
A319	CFM56-5A5	*B747*	CF6-80C2B1F
A320	CFM56-5-A1	*B763*	PW4062
A330	PW4168	*B777*	GE90-115B
A350	Trent XWB-84	*B787*	Trent 1000-E
AN-124	CF6-80C2A1	*CRJ-200*	CF34-3B
ATR-42	PW1215G	*C208*	PW6124A
ATR-72	PW1217G	*E190*	CF34-10E6
B722	JT8D-15	*E195*	CF34-10E7
B733	CFM56-3-B1	*RJ100*	LF507-1F-1H
B734	CFM56-3C-1		

3.5. Assumptions

The following assumptions have been made:

a) Aircrafts perform as the designed performance.

b) The LTO cycle stages, their time allocation, and requirements of engine thrust are as follows: The take-off process demands 100% engine thrust and takes 0,7 minutes (42 seconds); The climb-out process demands 85% engine thrust and takes 2,2 minutes (132 seconds); The approach process (the final approach and landing) demands 30% engine thrust and takes 4 minutes (240 seconds); Taxiing and idle process (taxi in and out) demands 7% engine thrust and takes 26 minutes (1560 seconds).

c) All flights fly in a standard atmosphere.

d) All flights fly as planned.

e) Wind and temperature and humidity conditions are disregarded.

f) The emissions are added up simply, disregarding the chemical reaction, drift, and diffusion of pollutants in the atmosphere.

3.6. GHG Calculation

The ANAC (2019)calculation approach was applied with standard values of emission factor and fuel properties for aviation kerosene published by the IPCC (2006) to calculate direct greenhouse gases: carbon dioxide (CO_2), methane gas (CH_4), and nitrous oxide (N_2O). The table 4 shows the emission factors by mass used in calculation, in kilogram of gas per kg of fuel burned, in addiction to fuel consumption per aircraft estimations in the LTO cycle.

Table 4 GHG Emissions Factor

GHG	*EF*	*Unity*
CO_2	$31,5(10^{-1})$	$kgCO_2/kgQAv$
N_2O	$88,2(10^{-6})$	$kgN_2O/kgQAv$
CH_4	$22,1(10^{-5})$	$kgCH_4/kgQAv$

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, to comprehend the operations at SBGL airport in 2019, and provide an overview potential for operations and pollutants emission, the HC, CO, NO_x, SO_x and PM emissions were estimated for each LTO phase. Also, CO_2, N_2O and CH_4, was calculated according to LTO phases and distributed by aircraft and carriers. With the trend of the increase in traffic volume and passenger transport for the near future, it will tend to increase the values found here.

The results point to NO_x as the largest emitted pollutant, and its growth potential will mainly affect communities near the airport. The effects of taxi time also become relevant given the potential congestion caused by a greater number of aircraft, as well the passenger occupancy rates.

4.1. Aircraft Movements

The SBGL experienced a total of 90.878 landing and takeoff movements in 2019, of which 83% were domestic and 17% were international. It operated with 62 regular carriers, distributed in passenger and cargo, with a wide variety of

aircraft types, including different manufacturers and specifications. Table 5 depicts the distribution of aircraft types and participation in the SBGL movement in 2019. As can be seen, the B738 (Boeing 737-800) represented 54% of all aircraft movement at the airport, followed by the A320 (Airbus 320) with 23% and E195 (Embraer 195) with 9%, all aircraft of typical use by major domestic passenger transport carriers.

Table 5 Distribution of aircraft types by LTO cycles in 2019 at SBGL

Aircraft type	*LTO*	*Aircraft type*	*LTO*
A300-200	2	*B738*	49.400
A319	1.886	*B747*	760
A320	20.756	*B763*	1.974
A330	2.788	*B777*	2.586
A350	4	*B787*	1.028
AN-124	4	*C208*	4
ATR-42	14	*CRJ-200*	14
ATR-72	8	*E 195*	7.984
B722	358	*E190*	124
B733	250	*RJ100*	2
B734	932		

4.2. Pollutant and GHG Emission Results

During the LTO cycle in 2019, aircraft emissions were expected to be 1,308,928 kg NOx, 844,747 kg CO, 93,757 kg HC, 72,112 kg SOx, and 11,482 kg PM, totaling roughly 2.33 million pollutants discharged. During the assessed time, the GHG received 283.940,4 tons of CO_2, 8 tons of N_2O, and 7,9 tons of CH_4 from the LTO cycle. According to the fuel flow rates in the ICAO (2021) database, the total fuel consumption for the LTO cycles in the SBGL was predicted to be around 90.140 tons/year in 2019. Table 6 depicts the distribution of pollutant emissions (HC, CO, NO_x, SO_x, and PM) for the modes of LTO cycles

Table 6 Distribution of LTO cycle emissions by mode

Pollutant (kg)	*Take-off*	*Climb-out*	*Approach*	*Taxi /Idle*
NO_x	103,2	199	53	48,8
CO	1,6	4,2	12	342,4
HC	0,2	0,6	0,7	51
SO_x	2,6	6,7	4,1	9,1
PM	0,5	0,9	0,6	1,1

When the distributions per mode for each pollutant are examined more closely, a slight variance for the flying modes is discovered. CO is the most prominent contaminant during downtime and taxis, accounting for 95% of all CO emissions. This trend is especially relevant to air quality around airports since aircraft spend the greatest time at terminals (Masiol and Harrison, 2014; Schürmann et al., 2007) The climb-out mode accounts for most NO_x emissions, accounting for 50% of total emissions, followed by the take-off mode, which accounts for 25%. Thus, time reduction in each mode is critical. Alternatives include the building of upgraded taxiways with quick intersections (straight taxiways with fewer stops, bends, and junctions) or pre-clearance and push-back traffic coordination, which would assist minimize taxiing times and downtime in aircraft operation, as well as monitoring and advertising daily taxi durations, which would aid in the quality control of operations.

The time in taxi mode, given as normal, is 26 minutes. Modifying this time, lowering it by 5 or 10 minutes, a reduction of 23% and 42% was discovered for the values mentioned in this study. The largest opportunities in approach mode are centered on traffic management measures, where you may prevent any form of radar vectors, delays, or actions that occur in the adoption of procedures for missed approaches by aircraft. The proper selection of leaving and arrival slots to the airport, in conjunction with the AMAN (Arrival Manager - Arrivals Manager) tool, also provides options for decreasing congestion, both during taxi and on approach. Furthermore, management methods that allow takeoffs without halting at the threshold, as well as the implementation of fines for carriers that do not adhere to the exact schedules of blocks outside, should be considered as a future potential, where there is increased congestion and demand for airport usage.

When analyzed the specific results shown in table 7, the B738 aircraft and the A320, had the highest percentages of participation and wind up being the largest pollutant emitters for the final amount. The A319, B722, B733, and B734, older aircraft with high consumption and emissions standards, also participated in the LTO cycles in substantial numbers. This level of

operation should be observed since the airport's activities are expanding, and the involvement of older aircraft is a hindrance. As a strategy to restrict rising emissions, life expectancy and engine type should be monitored. It is well known that airplanes with older engines (30 years on average) have higher emission indices than the same but new kind. As a result, prohibiting the operation at the airport of aircraft/companies with engine types other than those tested on a test bench and with more than 30 years of operation is a management technique to minimize local emissions.

below 65% or even lower. This suggests that some companies are inefficient and contribute to more emissions than others.

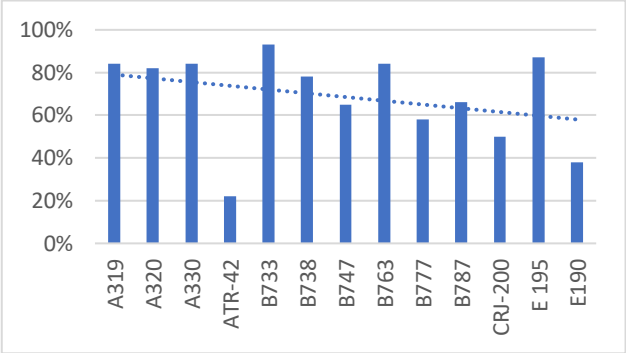


Figure 3 Average passenger occupancy per aircraft

Table 7 The SBGL's total emissions per LTO cycle in 2019

Aircraft	*HC*	*CO*	*NO_x*	*SO_x*	*PM (kg)*	*CO_2*	*N_2O*	*CH_4*
A300-200	11,86	55,87	49,41	2,79	0,41	10974,93	0,3	0,3
A319	1.121,65	11.974,87	16.473,53	1.102,67	188,66	4341752,30	121,6	127,4
A320	11.833,47	128.377,31	87.038,28	12.801,70	2.297,14	50406705,67	1411,4	1446,9
A330	434,93	37.590,49	77.709,27	4.537,54	626,23	17866577,94	500,3	480,6
A350	3,41	78,20	161,97	6,84	0,81	26938,55	0,8	0,8
AN-124	46,64	218,29	198,12	10,52	1,56	41412,47	1,2	1,1
ATR-42	0,13	49,71	62,77	5,05	0,46	19865,64	0,6	0,6
ATR-72	0,34	53,55	51,92	4,05	0,36	15958,14	0,4	0,5
B722	459,79	3.173,79	4.450,76	417,81	13,84	1645120,34	46,1	54,7
B733	208,93	3.258,63	1.797,47	156,69	17,12	616952,70	17,3	19,7
B734	534,63	10.421,87	8.966,63	668,77	76,82	2633271,68	73,7	79,7
B738	33.114,64	339.483,87	663.863,32	6.067,85	5.672,65	142017155,28	3976,5	3951,2
B747	9.596,16	44.059,74	32.583,85	2.001,10	295,65	7879343,47	220,6	214,9
B763	14.918,98	58.519,81	57.464,54	2.826,36	882,22	11128782,29	311,6	285,8
B777	10.158,05	98.469,68	176.436,48	6.013,55	650,46	23678371,79	663,0	608,0
B787	31,56	6.645,20	27.673,21	1.293,47	130,75	5093053,91	142,6	157,4
C208	0,00	19,61	16,68	1,37	0,14	5403,96	0,2	0,2
CRJ-200	10,21	103,12	30,17	3,68	0,60	14490,18	0,4	0,5
E190	211,57	1.686,13	704,37	60,12	8,30	16257707,42	455,2	478,9
E195	11.057,59	100.485,35	53.186,82	4.128,94	617,47	236717,66	6,6	7,2
RJ100	2,70	22,43	8,69	0,96	0,16	3799,47	0,1	0,1

However, in the case of cargo companies who use these older aircraft, further aspects must be considered. When compared to passenger carriers, cargo operational management is typically more efficient, resulting in superior aircraft performance even in the absence of technology that optimize fuel use.

4.3. Passenger Carrier Evaluation

Examining passenger carrier outcomes describes and explains about the company's operational management and efficiency rates. When it comes to occupancy rates, as indicated in figure 3, the average used by carriers in 2019 was around 80% or close to it, with some falling

As a matter of fact, any use of older aircraft is not really the first problem to be considered, because raising passenger load factor offers a short-term pollution mitigation method as well as a potential for higher profits for airlines. The table 8 illustrates how much a passenger contributed to emissions by aircraft under the conditions investigated.

When examining emissions per passenger, it is highlighted that the B733, an older aircraft, manages to retain a high degree of efficiency, especially when compared to the CRJ-200 or the E190, which are more contemporary and have lower emission rates, but are more polluting due to their low occupancy rates. The same is true for the B763, which has greater overall emissions

than the B747 but is more efficient when emissions are apportioned per passenger.

emissions mitigation is critical, as there is an immediate need for reduction measures and

Table 8 The SBGL's total Passenger Emissions in 2019

ACFT	Pollutants (kg/passenger)					GHC (kg/passenger)		
	NOx	*CO*	*HC*	*SOx*	*PM*	*CO2*	*N20*	*CH4*
A319	42,4	30,8	2,9	2,8	0,5	11176,1	0,3	0,3
A320	262,7	180,5	16,6	18,1	3,2	70795,7	2	2
A330	80,3	38,8	0,5	4,7	0,6	18455,9	0,5	0,5
ATR-42	5,4	4,2	0,01	0,4	0,04	1697,93	0,1	0,1
B733	0,1	0,2	0,01	0,01	0	35,51	0	0
B738	651,4	333,0	32,5	35,4	5,3	139331,7	4	3,9
B744	81,1	109,6	25,8	5	0,7	19601,7	0,6	0,5
B763	48,8	64,4	17,9	3,1	1	12245,5	0,3	0,3
B777	150,3	83,9	8,7	5,1	0,6	20167,7	0,7	0,5
B787	62,9	15,1	0,07	2	0,3	11572,6	0,3	0,4
CRJ-200	1,2	4,0	0,4	0,2	0,02	560,4	0,02	0,02
E190	6,2	14,9	1,9	0,5	0,1	2096,6	0,1	0,1
E195	501,3	947,6	103,9	39,2	6	153270,4	4,3	4,5

Figure 4 illustrates the difference in total pollutants emitted and the quantities that would be emitted if the maximum passenger capacity was used. Through using maximum occupations, almost 20% of the pollutants released over the year may be prevented. In the case of GHG, the reductions would be between 15% and 20%, resulting to an estimated 307.799 kg of CO_2 less per year just in LTO cycles.

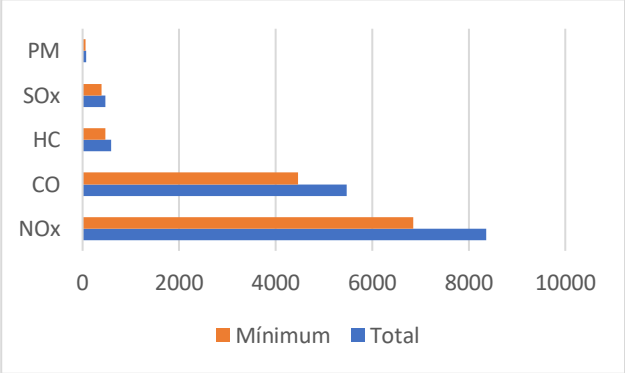


Figure 4 Amount Emissions Comparison

As an aggregate of all organizations that utilize comparable patterns and aircraft, this sort of analysis still provides a lot of uncertainty. In 2019, a regular passenger in SBGL released around 146 kgNO_x, 141 kgCO, 16.25 kgHC, 8.96 kg SO_x, 1.41 kgPM, 35,462 kgCO_2, 1.02 kgN_2O, and 1.01 kgCH_4. An evaluation of individual airline performance can reveal considerably more in the quest for strategic possibilities to reduce emissions. However, understanding how this component has a beneficial influence on international pressure for national operations to fit in the same way as the world's major economies.

5. CONCLUSION

It should be noted that the amount of pollutants created in this study is estimated using a set of assumptions. LTO cycle emissions are determined by the amount of time spent on-ground operations, idle time, and the actual and distinct procedures for each carrier. The ICAO criteria were employed in situations where engine timings and regiments are uniform, as well as in regular weather conditions, as were the techniques F.O.A 3.0 to assess the PM and ANAC to compute CHG. SBGL appears to be a polluting source with an impact on nearby areas. The increase in aviation operations, and therefore in LTO cycles, may have a significant influence in worsening local air quality. Based on the foregoing, it was determined that:

1. According to projections, SBGL's total fuel usage in LTO cycles in 2019 was 90.140 tons. There were about 2.33 million pollutants discharged, which were distributed as follows: 1.308.928 kgNOx, 844.747 kgCO, 93.757 kgHC, 72.482 kgSOx, and 11.482 kgPM. Only from airplane activity during the LTO cycle, 283.940,4 tons of CO_2, 8 tons of N_2O, and 7.9 tons of CH_4 were calculated. A typical SBGL passenger released around 146 kgNO_x,

141 kgCO, 16.25 kgHC, 8.96 kg SO_x, 1.41 kgPM, 35,462 kgCO_2, 1.02 kgN_2O, and 1.01 kgCH_4.

2. The domestic market has a significant impact on emissions, as evidenced by the B738 and A320 aircraft being the major polluters in 2019, with the greatest consumption and emissions rates. The aircraft mix at the airport must be regularly assessed to avoid obsolete engines contributing to emissions over the intended average for the operation. As the values of occupancy and carried cargo provide a short-term chance to minimize emissions, as certain firms run with occupancy below the average of 65 percent, an assessment of the individual performance of the companies becomes significant. If the maximum passenger occupancy was employed, all emissions would be reduced by roughly 20% for the numbers indicated. Although this method extends the usable life of particular engines, the operation of these aircraft must be balanced against the airport's environmental costs.

3. Taxi mode contributes the most to overall LTO cycle emissions, accounting for the most of CO, HC, SO_x, and PM emissions, as well as accounting for the full quantity of CH_4.The timing of this mode's occurrence can have a significant impact on emission rates, with a reduction of up to 42 percent in emissions for every 10 minutes less spent by taxi. The modes of climb-out and take-off contributed the most to NOx emissions, the pollutant with the greatest mass emitted throughout the year. Construction of improved taxiways, traffic coordination, and prior orders for taxi-in, take-off, and taxi time monitoring are all opportunities to minimize emissions in these modes. The management of radar vectors and holds during the final approach, as well as measures to prevent aircraft from performing missed approach procedures, are examples of how quicker operations in approach mode might be favored to lower emissions. Other managerial measures, such as an adequate program for distributing departure and arrival slots, the use of electronic air traffic management tools, and penalties for companies that do not comply with time-peak schedules, are necessary to avoid airport congestion and the consequent increase in time in each LTO cycle mode of operation.

SBGL appears to be a polluting source with influence in adjacent communities. The increase in air operations, and therefore LTO cycles, can play a substantial role in degrading local air quality. This analysis provides a preliminary step for future research on the consequences of pollution dispersion and its influence on communities surrounding airports and the opportunities to mitigate emissions from aviation activity. However, an individual assessment of the companies operating at the airport, their occupancy rates and values of cargo transported is necessary, as well as the real time spent in each mode of the LTO cycle. It is also proposed an examination of local collection in several locations close to the airport to determine the true impact of air activities on pollution in neighboring residences, in addition to analyzing the joint involvement of the two main airports in the city, since the area of operation of both airports can cover a considerable percentage of the metropolitan territory of the state and contribute negatively to critical neighborhoods in Rio de Janeiro.

References

ANAC, A. N. de A. C. (2019). *Metodologia de cálculo inventário de emissões atmosféricas*. https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/MetodologiadeCalculov1agosto2019.pdf

ANAC, A. N. de A. C. (2021). *Data Statistics Base for Air Transport.* https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/empresas-aereas/envio-de-informacoes/base-de-dados-estatisticos-do-transporte-aereo

Centracchio, F., Rossetti, M., & Iemma, U. (2018). *Approach to the Weight Estimation in the Conceptual Design of Hybrid-Electric-Powered Unconventional Regional Aircraft*. *2018*.

CGNA - Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. (2019). *ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE TRÁFEGO AÉREO 2019*. http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads

/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2019.pdf

Dodson, R. E., Andres Houseman, E., Morin, B., & Levy, J. I. (2009). An analysis of continuous black carbon concentrations in proximity to an airport and major roadways. *Atmospheric Environment*, *43*(24), 3764–3773. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.014

Fajersztajn, L., Guimarães, M. T., Duim, E., Silva, T. G. V. da, Okamura, M. N., Brandão, S. L. B., Ribeiro, A. E., Naud, L. M., O'Sullivan, S., Saldiva, P. H. N., & Cardoso, M. R. A. (2019). Health effects of pollution on the residential population near a Brazilian airport: A perspective based on literature review. *Journal of Transport & Health*, *14*, 100565. https://doi.org/10.1016/J.JTH.2019.05.004

Fan, W., Sun, Y., Zhu, T., & Wen, Y. (2012). Emissions of HC, CO, NOx, CO2, and SO2 from civil aviation in China in 2010. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, *56*, 52–57. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.052

Heal, M. R., Kumar, P., & Harrison, R. M. (2012). Particles, air quality, policy and health. *Chemical Society Reviews*, *41*(19), 6606–6630. https://doi.org/10.1039/C2CS35076A

Henkes, J. A., & Pádua, A. D. B. de. (2017). Desenvolvimento Sustentável Na Aviação Brasileira: *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, *6*(2), 534. https://doi.org/10.19177/rgsa.v6e22017534-552

Hsu, H. H., Adamkiewicz, G., Andres Houseman, E., Vallarino, J., Melly, S. J., Wayson, R. L., Spengler, J. D., & Levy, J. I. (2012). The relationship between aviation activities and ultrafine particulate matter concentrations near a mid-sized airport. *Atmospheric Environment*, *50*, 328–337. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.002

Hsu, H.-H., Adamkiewicz, G., Houseman, E. A., Zarubiak, D., Spengler, J. D., & Levy, J. I. (2013). Contributions of aircraft arrivals and departures to ultrafine particle counts near Los Angeles International Airport. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, *444*, 347–355. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.010

Hudda, N., Durant, L. W., Fruin, S. A., & Durant, J. L. (2020). Impacts of Aviation Emissions on Near-Airport Residential Air Quality. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, *54*(14), 8580–8588. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01859

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. (2016). *Environmental Technical Manual - Volume II Procedures for the Emissions Certification of Aircraft Engines: Vol. II* (Issue February). https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/SGAR_2016_ETM_Vol2.pdf

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. (2021). *ICAO Databank on Aircraft Engine Emissions*. https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank

IPCC. (2006). Chapter 2.3: Mobile Combustion. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 1–78. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html

Masiol, M., & Harrison, R. M. (2014). Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric Environment*, *95*, 409–455. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.070

Mazaheri, M., Johnson, G. R., & Morawska, L. (2011). An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport. *Atmospheric Environment*, *45*(20), 3500–3507. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.012

Raper, D. W., Longlmrst, J. W. S., & Conlan, D. E. (1970). The Impact Of Airport Operations On Urban Air Quality. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *4*. https://doi.org/10.2495/AIR940112

Riogaleão. (2021). *Airport numbers*. https://www.riogaleao.com/corporativo/page/numeros-do-aeroporto

Sabatier, T., Sarrat, C., Aubry, S., & Chaboud, T. (2021). Quantification of the airport-related pollution under wintertime anticyclonic conditions from idealized large-eddy simulations. *Atmospheric Environment*, *262*(December 2020). https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118619

Schürmann, G., Schäfer, K., Jahn, C., Hoffmann, H., Bauerfeind, M., Fleuti, E., & Rappenglück, B. (2007). The impact of NOx, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. *Atmospheric Environment*, *41*(1), 103–118. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.030

Shirmohammadi, F., Lovett, C., Sowlat, M. H., Mousavi, A., Verma, V., Shafer, M. M., Schauer, J. J., & Sioutas, C. (2018). Chemical composition and redox activity of PM0.25 near Los Angeles International Airport and comparisons to an urban traffic site. *Science of the Total Environment*, *610–611*, 1336–1346. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.239

Tokuslu, A. (2020). Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport. *ENERGY*, *206*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118219

Vujović, D., & Todorović, N. (2017). An assessment of pollutant emissions due to air traffic at Nikola Tesla International Airport, Belgrade, and the link between local air quality and weather types. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *56*(August), 85–94. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.003

Yim, S. H. L., Lee, G. L., Lee, I. H., Allroggen, F., Ashok, A., Caiazzo, F., Eastham, S. D., Malina, R., & Barrett, S. R. H. (2015). Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions. *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, *10*(3). https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034001

.

IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO SOFT E HARD PARA MINIMIZAR OS IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NO SETOR DE TRANSPORTE AÉREO

Gabriella Machado Darze[1], Victor Hugo Souza de Abreu[1], Elton Fernandes[1] & Andréa Souza Santos[1]
[1]Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE)

*** Endereço de e-mail do autor correspondente**: gabriella.darze@pet.coppe.ufrj.br

PAPER ID: SIT175

Resumo

O setor de transportes possui uma característica particular: embora seja um dos setores que mais contribuem para o aumento das emissões de gases de efeito estufa, é um dos que mais sofre com os impactos das mudanças climáticas em sua infraestrutura e operação. Assim, é necessário que, para além dos esforços de promoção de medidas de mitigação, esforços significativos para reduzir as vulnerabilidades às alterações climáticas sejam feitos, aumentando a resiliência do setor. Nesse contexto, o setor de transporte aéreo é particularmente vulnerável às condições climáticas adversas, que variam de acordo com a localização geográfica, resultando em riscos operacionais, atrasos e perda de receita . Assim, este estudo busca identificar na literatura as medidas de adaptação (tanto *soft* quanto *hard*) que vêm sendo adotadas pelos tomadores de decisão para aumentar a resiliência do transporte aéreo frente aos impactos das mudanças climáticas por meio de uma revisão sistemática da literatura com abordagem bibliométrica. Para isso, foram consideradas quatro etapas: (i) protocolo de revisão; (ii) buscas diretas e documentais; (iii) processamento de dados (repositório de pesquisa); e (iv) análise sistemática dos estudos identificados. Durante a revisão, foram identificados como exemplos de medidas de adaptação: (i) em um contexto *soft*, maior colaboração em nível global, avaliação de risco e gestão adaptativa, desenvolvimento de sistemas de medição para avaliar e comparar a vulnerabilidade do espaço aéreo e dos aeroportos e inclusão dos aspectos das alterações climáticas no plano director de gestão do tráfego aéreo do aeroporto; (ii) em um contexto *hard*, alterações na infraestrutura aeroportuária e estrutura de aeronaves, alteração de horários de voos em dias quentes, realocação de voos para aeroportos maiores e alteração modal em casos de impossibilidade de voo. O desenvolvimento desta pesquisa envolve avançar na questão de analisar a questão: essas medidas serão suficientes para o cenário futuro das mudanças climáticas? Se não, que novas medidas seriam necessárias?

Palavras-chave: Transporte Aéreo, Mudança Climática, *Soft Adaptation*, *Hard Adaptation.*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil - Código de Financiamento 001. Este trabalho contou com o apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, sob o número #2021007191.

1. INTRODUÇÃO

Embora seja um dos setores que mais contribuem para o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), com 23% das emissões globais de CO_2 em 2019, o setor de transportes é também um dos que mais sofre com os impactos da mudança climática em sua infraestrutura e operação. Dessa forma, exige-se que esforços significativos sejam empregados para identificar vulnerabilidades da mudança climática e tendências na adaptação, aumentando assim a resiliência do setor (IPCC, 2014; Jamillo *et al.* 2022). Ainda assim, medidas de adaptação dos transportes às mudanças climáticas ainda são escassas e espalhadas por um amplo número de periódicos e autores, com ênfase no transporte rodoviário e aquaviário, e muito menos no transporte ferroviário e aéreo (Eisenack et al., 2012).

No âmbito do setor de transporte aéreo, os aeroportos são frequentemente classificados como infraestrutura nacionalmente crítica , dada a importância de facilitar tanto a mobilidade, quanto o crescimento econômico de um país. No entanto, eles são particularmente vulneráveis às condições meteorológicas e climáticas adversas, como temperaturas mais altas, aumento do nível do mar e episódios de precipitação intensa, que variam de acordo com a localização geográfica e a escala das operações, resultando em atrasos e perda de receita - rendimento do aeroporto - (Stamos, Mitsakis & Grau, 2015; Burdidge, 2016a). Além dos impactos observados nos aeroportos, alterações no funcionamento das aeronaves e nas operações dos voos também estão presentes, como atrasos ou cancelamento de voos devido a mudanças de rotas na presença de tempestades, limitações do peso máximo das aeronaves em decorrência de elevadas temperaturas, dentre outros impactos (Burdidge, 2016b).

Nesse sentido, este estudo busca destacar medidas de adaptação (tanto *hard adaptation,* que consiste em medidas de cunho físico e estrutural, quanto *soft adaptation*, que consiste em medidas de governanças, educação e participação social [de Abreu, 2022]) que podem ser implantadas por tomadores de decisão para aumentar a resiliência do setor de transporte aéreo frente aos impactos da mudança climática em sua infraestrutura e operação. Para isso, são realizadas buscas diretas em bases de dados e buscas documentais, como complementação. Para cumprir os objetivos do estudo, além da seção introdutória, a Seção 2 aborda a metodologia adotada para a condução das buscas, as Seções 3 e 4 apresentam resultados bibliométricos e sistemáticos, respectivamente, e a Seção 5 contém as considerações finais, com sugestões para estudos futuros sobre o tema.

2. METODOLOGIA

Este estudo consiste em uma revisão sistemática da literatura com abordagem bibliométrica a respeito do estado da arte referente às medidas de adaptação do setor aéreo frente aos impactos decorrentes de extremos climáticos. Dessa forma, os objetivos do estudo são definidos, as principais palavras de busca são escolhidas, uma busca direta em diferentes bases de dados (*Scopus*, *Web of Science* e Google Acadêmico) é realizada para a criação e análise do repositório de pesquisa. As fases da pesquisa encontram-se na Figura 1.

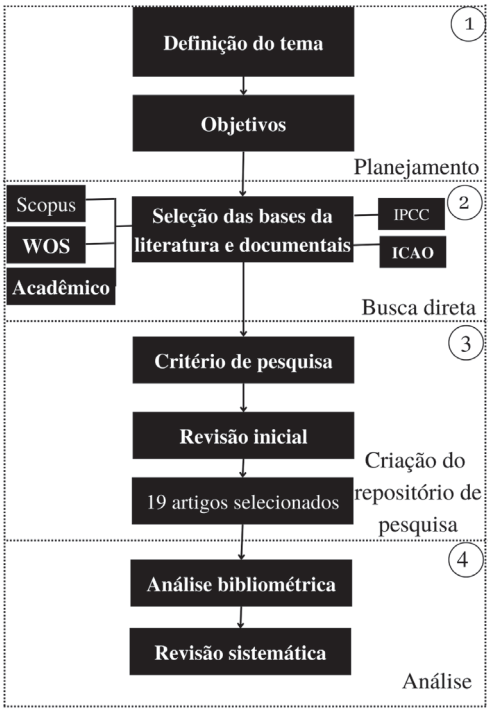


Figura 1. Etapas de desenvolvimento do estudo.

Primeiramente, os objetivos do estudo são definidos, assim como as palavras-chave e suas combinações. Os termos de busca foram *"climate change"*, *"air transport*"* e

"adaptation". A busca incluiu palavras-chave e tópicos de busca.

A busca direta nas bases de dados retornou 20 resultados na base *Scopus*, 8 na base *Web of Science* e mais de 1 milhão de resultados no Google Acadêmico, no entanto, dada a grande quantidade de resultados de baixa relevância, apenas as 20 primeiras publicações foram consideradas nesta última base de dados. Além de buscas em bases de dados, consultas documentais foram realizadas no relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) de 2022 e no relatório do meio ambiente da Organização de Aviação Civil Internacional de 2019 (ICAO, *International Civil Aviation Organization*) [IPCC, 2022; ICAO, 2019].

Montado o repositório de pesquisa, as publicações duplicadas foram identificadas e removidas, para que, então, os critérios de seleção pudessem ser aplicados. Foram eles: apenas estudos dos últimos 10 anos foram considerados (2012-2022); estudos que não abordavam impactos da mudança climática sobre a aviação foram prontamente removidos; aqueles que não discutiam as limitações sobre as impactos ou adaptações da mudança climática no setor aéreo foram removidos; apenas estudos de fontes relevantes foram considerados; publicações que não apontavam medidas de adaptação ou indicações de caminhos futuros para o alcance da resiliência do setor aéreo fosse atingida, foram excluídas; além disso, o prestígio da fonte foi utilizado também como critério de seleção, tendo o Fator de Impacto ou importância/relevância da instituição da fonte como referência. Após a aplicação dos critérios de seleção, apenas 19 estudos foram incluídos no repositório final de pesquisa.

Por último, uma análise bibliométrica e sistemática dos estudos selecionados foi conduzida, identificando as principais características dos estudos selecionados e as medidas de adaptação abordadas frente aos extremos climáticos.

3. DISCUSSÕES

Os estudos incluídos no repositório de pesquisa puderam ser agrupados de acordo com o ano de suas publicações, presentes na Figura 2. Nela, os primeiros estudos datam de 2008, indo além do repositório de pesquisa. Essa estratégia foi adotada para melhor compreensão da evolução dos estudos ao longo dos anos, uma vez que o número de publicações obtidas foi baixo. A análise em questão expõe a expansão do tema e o nível de importância que tem sido dado a ele em escala global. Na busca aqui realizada, percebe-se que o tema passa a ser abordado a partir de 2007, ano em que o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, publicado em 2007 - AR4 (IPCC, 2007) foi publicado, dando maior relevância aos impactos da mudança climática sobre os transportes. Nota-se, também, um crescimento nas publicações após a divulgação do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC - AR5 em 2014, atingindo o máximo em 2016 e, posteriormente, um novo crescimento a partir de 2020.

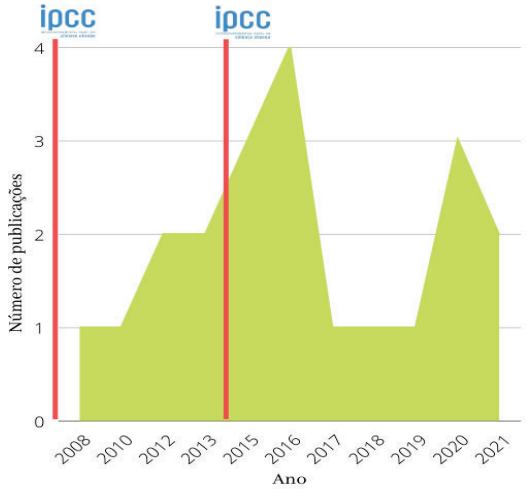


Figura 2. Número de publicações ao longo dos anos. As linhas em vermelho sinalizam os anos em que foram publicados os relatórios do IPCC.

Uma outra análise consiste em verificar quais os países que mais publicam sobre o tema, expostos na Figura 3. A partir da análise da figura, é possível perceber uma concentração de estudos em países desenvolvidos, principalmente do hemisfério norte, tais como Estado Unidos e Reino Unido, indicando uma carência de estudos em países subdesenvolvidos ou em estágio de desenvolvimento, que apresentam maior vulnerabilidade aos impactos da mudança climática , em virtude de maiores restrições orçamentárias e menores investimentos em pesquisas sobre o assunto.

Nesse cenário, destaca-se também o Brasil, com apenas uma publicação, indicando

que ainda não é dada a devida importância ao tema e que os principais extremos climáticos aos quais o sistema aéreo no país está sujeito, ainda não são devidamente conhecidos. Além disso, nota-se um maior destaque dado a planos de adaptação e análises de risco com enfoque nos setores terrestres, como o ferroviário e o rodoviário, como projetos como o AdaptaVias, no âmbito do ProAdapta [Projeto AdaptaVias].

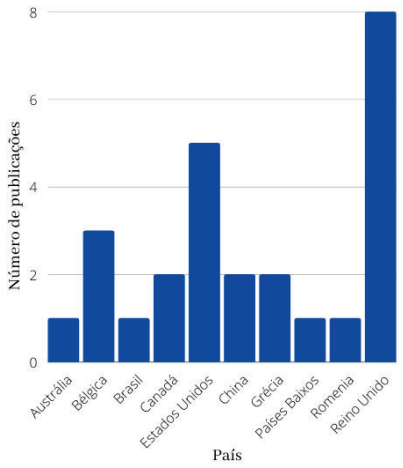


Figura 3. Divisão de estudos por região de publicação.

A revisão sistemática permitiu ainda que os principais extremos climáticos, aos quais o setor aéreo está sujeito, fossem identificados, conforme informações apresentadas na Figura 4. Nela, nota-se que os principais extremos climáticos abordados pelas publicações são: (i) aumento das temperaturas, com 25% do total, impactando a operação das aeronaves e a infraestrutura dos aeroportos, seguido por (ii) aumento do nível do mar (15,9%), afetando aeroportos em áreas costeiras com inundações e (iii) precipitações intensas (13,6%), impactando a segurança e operação das aeronaves, devido às inundações. Destaca-se ainda que a categoria "Geral" engloba estudos que abordam mais de cinco extremos climáticos, dentre esses, encontram-se artigos de revisão bibliográfica e artigos que abordam os impactos e possíveis adaptações frente aos diversos extremos climáticos no setor aéreo geral, sem abordar estudos de casos específicos.

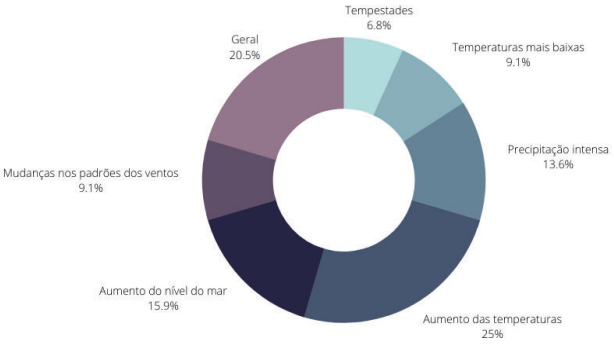


Figura 4. Principais extremos climáticos abordados nos estudos, presentes no repositório de pesquisa.

Cabe ainda observar os principais impactos causados ao setor para que melhor se possa entender as medidas de adaptação propostas. Quanto aos impactos, uma divisão pôde ser feita com base em seu tipo: danos causados à infraestrutura dos aeroportos ou danos causados à operação do sistema. As Figuras 5 e 6 expõem os principais impactos. Na Figura 5, é possível verificar que o dano mais recorrentemente abordado em relação aos extremos climáticos refere-se a inundações decorrentes das elevadas precipitações, seguido de congelamento das pistas e acúmulo de neve, consequência de condições climáticas presentes majoritariamente em países de maior longitude. Além disso, na Figura 6, nota-se que os principais impactos causados à operação são a restrição de peso, decorrente das elevadas temperaturas durante os meses de verão e alterações da demanda, fruto da mudanças na distribuição de temperaturas ao longo dos meses do ano, impactando as épocas em que as viagens são realizadas.

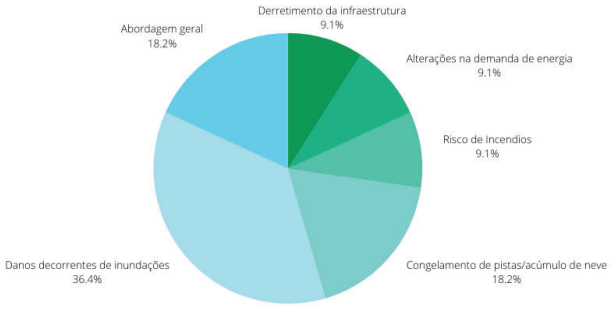


Figura 5. Impactos dos extremos climáticos na infraestrutura do setor aéreo.

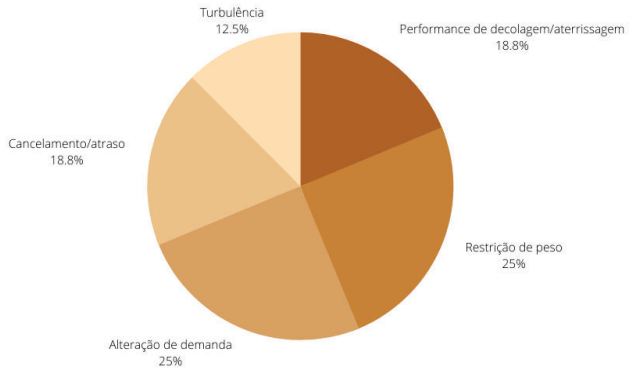


Figura 6. Impactos dos extremos climáticos na operação do setor aéreo.

Além dos fenômenos climáticos, as medidas de adaptação foram identificadas e divididas em duas categorias, conforme mencionado anteriormente: as chamadas *hard adaptations* que consistem em medidas físicas de adaptação, dispostas na Tabela 1, já as *soft adaptations* consistem em medidas de governança, educação e participação social, presentes na Tabela 2. Dentre as *hard adaptations* percebe-se um destaque para aumento do tamanho das pistas de pouso/decolagem, instalações de sistemas de refrigeração e alterações nos projetos de aeronaves. Já para as *soft adaptations*, percebe-se uma maior quantidade de estudos, identificando lacunas ainda existentes e maior colaboração a nível global.

Tabela 1: *Hard adaptations.*

Extremo climático	Medidas de adaptação	Referência
Mais de 3 extremos, tais como, temperaturas elevadas e baixas, tempestades e precipitação intensa.	Estudar cada caso mais detalhado para melhor compreensão dos principais impactos (análise de risco); Mudar a localização de instalações de transporte localizadas em regiões mais expostas às novas condições climáticas.	Zhou & Chen, (2020); Suhrbier, (2008, May 15).
Temperaturas elevadas	Evitar decolagens em situações de temperaturas elevadas; aumentar o tamanho das pistas; remanejar voos com aeronaves maiores para aeroportos de maiores portes, em caso de impossibilidade de aumento das pistas de pouso, devido a restrições de área disponível para tal; instalar sistemas de refrigeração nos aeroportos que ainda não possuem.	Zhao & Sushama, (2020), Debortoli *et. al*, (2019); Dimitriou, (2016), Budd &Ryley, (2012).
Temperaturas baixas	Implementar sistemas de descongelamento de aeronaves e remoção de neve.	Budd & Reyley, (2012).
Tempestades	Aceitar desvios significativos de planos de voo em virtude de tempestades e turbulência; Aprimorar os padrões mínimos de projeto das aeronaves para garantir que as estruturas das aeronaves possam suportar as tensões estruturais mais altas que possam ser impostas a elas.	Budd & Ryley, (2012); Bălan & Vasil, (2013).
Precipitações intensas	Instalar melhores sistemas de drenagem nas pistas de pouso/decolagem.	Suhrbier, (2008, May 15).

Tabela 2: *Soft adaptations.*

Medidas de adaptação	Referência
Identificar lacunas no conhecimento existente sobre os impactos.	Burbidge, (2018); Ryley & Coulter, (2020); Burbidge (2016a)
Implementar políticas que aumentem a conscientização das partes envolvidas.	Burbidge, (2018); Burbidge (2016a);
Promover a colaboração a nível global, com troca de informações a respeito de medidas já existentes e alertas de novos impactos decorrentes de novas condições climáticas.	Burbidge, (2018); Ryley & Coulter, (2020); Suhrbier, (2008, May 15)
Implementar gestões adaptativas de menor custo, com o intuito de evitar arrependimentos (com futuras alterações).	Burbidge, (2018); Burbidge (2016b)

Alterar os negócios aeroportuários para que se adaptem às novas demandas de passageiros.	Dimitriou, D. J. (2016); Hepburn & Müller, (2010)
Fornecer assistência financeira para países em desenvolvimento, para que estes possam melhor investir no aumento da resiliência do setor.	Hepburn & Müller, (2010)
Investir em substituição modal em casos de impossibilidade de operação das aeronaves e implementação de políticas e programas específicos para agilizar os procedimentos de substituição modal.	Zhou & Chen, (2020)
Investir em mais medidas de mitigação, com o intuito de diminuir os impactos e, consequentemente, os custos de adaptação.	Neumann *et. al,* (2014)
Criar um novo índice de resiliência, de modo que o atual estado de adaptabilidade do setor aéreo de cada região possa ser melhor medido e analisado.	Poo *et. al*, (2021)
Promover ações em áreas que deverão experimentar um alto crescimento na demanda e impactos significativos das mudanças climáticas,	Burbidge (2016a)
Aumentar os padrões de segurança para os funcionários que atuam em solo.	Bălan & Vasil, (2013)

As Tabelas 1 e 2 apontam que as medidas de adaptação podem ser divididas de acordo com o tipo de análise desejada. Dois grupos de estudos, por exemplo são: medidas voltadas para a adaptação de aeroportos, como aumento das pistas, implementação de sistemas de refrigeração e melhores sistemas de drenagens das pistas; e medidas voltadas para a adequação das aeronaves, como aprimoração dos projetos das aeronaves e descongelamento das aeronaves em dias frios. Outra divisão possível consiste em quatro grupos: medidas voltadas para o planejamento, como estudar casos mais detalhados dos impactos, mudanças na localização de instalações de transportes alocadas em áreas mais vulneráveis ou em áreas de risco; operação, como evitar os voos em dias muito quentes e aceitar alterações nas rotas de voo em circunstâncias extremas, como tempestades; monitoramento, como criação de novos indicadores e índices de resiliência para melhor acompanhar a evolução do nível de adaptação dos sistemas em todo mundo; ações corretivas, como melhorias dos sistemas de drenagem das pistas e aumento dos padrões de segurança para funcionários que atuam em solo durante o abastecimento e carregamento das aeronaves.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância dada aos impactos da mudança climática no setor aéreo (estratégias de adaptação) tem crescido nos últimos anos, diversificando-se para além dos impactos da aviação na mudança climática (estratégias de mitigação); entretanto, o assunto ainda é incipiente, principalmente quanto a outros modos de transporte como o rodoviário, por exemplo.

Embora alguns estudos tenham mostrado variadas medidas de adaptação, tanto operacionais, quanto na infraestrutura do setor aéreo, há, ainda, muitas lacunas de conhecimento a respeito do tema. Por exemplo, a predominância de estudos em países desenvolvidos do hemisfério norte, indica que muitas ameaças climáticas de países localizados mais próximos ao equador, sujeitos a condições climáticas adversas daquelas enfrentadas por países de mais altas latitudes, ainda não são conhecidas, sugerindo que as medidas de adaptação existentes talvez não sejam adequadas para essas regiões. Nesse cenário enquadra-se o Brasil, com a maior parcela de seu território entre o trópico de Capricórnio e a linha do Equador, o que lhe atribui características climáticas diferentes daquelas de países desenvolvidos do hemisfério norte, mais distantes dos trópicos.

Além disso, cabe destacar que, apesar de ser um tema em crescimento, há ainda a necessidade de realização de estudos de casos considerando as características e peculiaridades

locais, inclusive envolvendo Análise de Risco Climático, tornando limitado o conhecimento a respeito dos possíveis impactos e respectivas medidas de adaptações. O baixo número de publicações que abordam a vulnerabilidade dos sistemas de transporte aéreo por meio do uso de dados reais para criação de indicadores de sensibilidade e capacidade adaptativa no mundo também é baixa, o que indica, ainda, que as medidas de adaptação sugeridas até o momento podem não ser suficientes para tornar o setor aéreo resiliente, uma vez que diversas circunstâncias ainda são desconhecidas.

Essa carência de estudos abre, assim, possibilidades de estudos futuros que abordem regiões ainda pouco estudadas, assim como outros extremos climáticos, cujos impactos ainda são pouco conhecidos. Além disso, aconselha-se que o nível atual de resiliência dos sistemas seja melhor conhecido para que novas medidas de adaptação possam ser propostas e, assim, tornem-se suficientes para aumentar o grau de resiliência do setor em um cenário de mudança climática.

Referências

Bălan, M., & Vasil, V. (2013). Measures to reduce transportation greenhouse gas emissions in Romania. Quality - Access to Success, 14(1), 306–309.

Budd, L., & Ryley, T. (2012). Chapter 3 an international dimension: Aviation. In *Transport and Sustainability* (pp. 39–64). Emerald Group Publishing Limited. http://dx.doi.org/10.1108/s2044-9941(2012)0000002006

Burbidge, R. (2016a). Adapting European airports to a changing climate. *Transportation Research Procedia*, *14*, 14–23. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.036

Burbidge, R. (2016b). Aviation climate resilience: Clarifying the impacts and identifying the barriers. *International Journal of Aviation Management*, *3*(2/3), 88. https://doi.org/10.1504/ijam.2016.079946

Burbidge, R. (2018). Adapting aviation to a changing climate: Key priorities for action. *Journal of Air Transport Management*, *71*, 167–174. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.04.004

Coffel, E. D., Thompson, T. R., & Horton, R. M. (2017). The impacts of rising temperatures on aircraft takeoff performance. *Climatic Change*, *144*(2), 381–388. https://doi.org/10.1007/s10584-017-2018-9

Coffel, E., & Horton, R. (2015). Climate change and the impact of extreme temperatures on aviation. *Weather, Climate, and Society*, *7*(1), 94–102. https://doi.org/10.1175/wcas-d-14-00026.1

de Abreu, V. H. S., Santos, A. S., & Monteiro, T. G. M. (2022). Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. *Sustainability*, *14*(14), 8864. https://doi.org/10.3390/su14148864

Debortoli, N. S., Clark, D. G., Ford, J. D., Sayles, J. S., & Diaconescu, E. P. (2019). An integrative climate change vulnerability index for Arctic aviation and marine transportation. *Nature Communications*, *10*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-10347-1

Dimitriou, D. J. (2016). Climate change implications in aviation and tourism market equilibrium. In *Climate Change Management* (pp. 409–424). Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-39880-8_25

Dunn, S., & Wilkinson, S. M. (2016). Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *90*, 39–50. https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.09.011

Gratton, G. B., Williams, P. D., Padhra, A., & Rapsomanikis, S. (2021). Reviewing the impacts of climate change on air transport operations. *The Aeronautical Journal*, *126*(1295), 209–221. https://doi.org/10.1017/aer.2021.109

Hepburn, C., & Müller, B. (2010). International

air travel and greenhouse gas emissions: A proposal for an adaptation levy1. *World Economy*, *33*(6), 830–849. https://doi.org/10.1111/j.1467-9701.2010.01287.x

ICAO . (2019). *ICAO environmental report 2019 : destination green : the next chapter* (pp. 252–275). https://www.icao.int/environmental-protection/pages/envrep2019.aspx

Jaramillo, P., S. Kahn Ribeiro, P. Newman, S. Dhar, O.E. Diemuodeke, T. Kajino, D.S. Lee, S.B. Nugroho, X. Ou, A. Hammer Strømman, J. Whitehead, 2022: Transport. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.012.

Junior, F. A., & Kahn, S. (2015). Impactos das Condições Meteorológicas no Padrão Operacional, Atrasos e Cancelamentos do Aeroporto Santos Dumont. *In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, XXIX ANPET.* Ouro Preto, Brasil.

Koetse, M. J., & Rietveld, P. (2012). Adaptation to climate change in the transport sector. *Transport Reviews*, *32*(3), 267–286. https://doi.org/10.1080/01441647.2012.657716

Neumann, J. E., Price, J., Chinowsky, P., Wright, L., Ludwig, L., Streeter, R., Jones, R., Smith, J. B., Perkins, W., Jantarasami, L., & Martinich, J. (2014). Climate change risks to US infrastructure: Impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage. *Climatic Change*, *131*(1), 97–109. https://doi.org/10.1007/s10584-013-1037-4

Poo, M. C.-P., Yang, Z., Dimitriu, D., & Qu, Z. (2021). An advanced climate resilience indicator framework for airports: A UK case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *101*, 103099. https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103099

Projeto AdaptaVias. (n.d.). Ministério Da Infraestrutura. Retrieved August 18, 2022, from https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/projeto-adaptavias

Ryley, T., Baumeister, S., & Coulter, L. (2020). Climate change influences on aviation: A literature review. *Transport Policy*, *92*, 55–64. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.010

Suhrbier, J. H. (2008, May 15). Potential impacts of climate change and variability for transportation long-range planning and investment. *Transportation Land Use, Planning, and Air Quality*. http://dx.doi.org/10.1061/40960(320)40

Williams, P. D., & Joshi, M. M. (2013). Intensification of winter transatlantic aviation turbulence in response to climate change. *Nature Climate Change*, *3*(7), 644–648. https://doi.org/10.1038/nclimate1866

Zhao, Y., & Sushama, L. (2020). Aircraft takeoff performance in a changing climate for Canadian airports. *Atmosphere*, *11*(4), 418. https://doi.org/10.3390/atmos11040418

Zhou, L., & Chen, Z. (2020). Measuring the performance of airport resilience to severe weather events. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *83*, 102362. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102362.

USO DA ABORDAGEM *FUZZY* PARA DETERMINAR CENÁRIOS ASSOCIADOS À ESCOLHA DE ÁREAS PARA INSTALAÇÃO DE *VERTIPORTS*

Adriano da Rocha Ferreira[1], Giovanna Miceli Ronzani Borille[2], Eduardo Moraes Arraut[3], Vinícius do Prado Capanema[4]

adrirch1@gmail.com[1], ronzani@ita.br[2], emarraut@ita.br[3] e viniciuscapanema@hotmail.com[4]

PAPER ID: SIT165

RESUMO

Novas alternativas de mobilidade têm sido buscadas com o intuito de minimizar impactos negativos decorrentes do congestionamento do tráfego urbano. Dentre essas alternativas, surge a *Urban Air Mobility* (UAM), que pode ser definida como uma forma segura e eficiente de tráfego aéreo conduzidas por veículos não tripulados. Essa nova abordagem tornou-se possível a partir do desenvolvimento de novas tecnologias da aviação. Tais tecnologias permitiram o desenvolvimento de veículos tripulados e não tripulados chamados de *eVTOL* (do inglês *eletric Vertical Take-off and Landing*). A infraestrutura necessária para a introdução dos serviços de UAM vem acompanhada de desafios e de limitações que as empresas devem enfrentar ao entrar neste mercado. Dentre esses, cita-se a tomada de decisão quanto à localização dos *vertiports* para a realização das operações a qual deve ser baseada em critérios, como demanda de usuários, disponibilidade de espaço e viabilidade da implantação da infraestrutura local. Este trabalho tem como objetivo determinar as áreas mais favoráveis para a construção da infraestrutura terrestre necessária às operações da UAM, mediante a análise de diferentes critérios com base criação de cenários utilizando a abordagem *Fuzzy*. Foram utilizados cinco operadores diferentes: fuzzy AND, OR, Produto Algébrico, Soma Algébrica e fuzzy GAMMA com os valores de GAMMA de 0,2, 0,5 e 0,9. Os resultados revelaram diferentes cenários para o fenômeno estudado. Os operadores Produto Algébrico e GAMMA 0,2 apresentaram cenários mais restritivos, ou seja, menor extensão de áreas favoráveis à instalação de *vertiports*. O oposto ocorreu com os operadores OR e Soma Algébrica, que apresentaram cenários menos restritivos resultando em maiores áreas com favorabilidade. O *fuzzy* GAMMA 0,5 e 0,9 apresentaram cenários intermediários. É importante destacar que, o estudo não identificou áreas exatas para instalação de *vertiports*, mas indicando quais são as áreas mais favoráveis e excluindo as áreas menos favoráveis à instalação de *vertiports*.

Palavras-chave: *Urban Air Mobility. eVTOL. Vertiports. Fuzzy.*

1. INTRODUÇÃO

O congestionamento do tráfego urbano terrestre é decorrente de fatores como a alta densidade populacional e o aumento da frota de veículos próprios (Rajendran & Srinivas, 2020). Estes autores destacam que em decorrência disso, em cidades metropolitanas, os usuários do sistema viário tiveram seu tempo de permanência no trânsito aumentado, ocasionando um aumento de estresse e ansiedade. Além disso, o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, impacta de forma prejudicial à saúde dos usuários dos meios de transporte e também o meio ambiente (Rajendran & Srinivas, 2020). É possível observar que a busca por novas soluções de mobilidade urbana ocasionou o surgimento de inovações baseadas em novas tecnologias para o transporte de passageiros e de cargas, como a Mobilidade Aérea Urbana (UAM, do inglês *Urban Air Mobility*) (Paul; De Lorenzo; Cordioli., 2020).

A UAM é definida como um sistema de transporte seguro e eficiente de tráfego aéreo em áreas metropolitanas conduzido por aeronaves e sistemas aeronáuticos não tripulados (Paul et al., 2020; Thipphavong et al., 2018; Vascik & Hansman, 2018). Esses veículos, que tem como característica o pouso e a decolagem verticais e são movidos principalmente a eletricidade, são conhecidos como *eVTOL*, (do inglês *eletric Vertical Take-Off and Landing*). Por serem movidos a eletricidade, sua utilização está associada a um conceito mais sustentável, garantindo redução nas emissões de CO_2 (Rajendran & Srinivas, 2020). Projetados, sobretudo, para operar em centros urbanos, o desenvolvimento e a produção desses veículos devem estar pautados, principalmente, quanto à segurança de voo e ao impacto sonoro que exercem, a fim de garantir uma maior aceitação pela comunidade.

Um aspecto de suma importância para implementação da UAM é a infraestrutura necessária para o controle das operações e para o embarque e o desembarque de passageiros e de cargas. A implementação de infraestrutura adequada para a introdução dos serviços de UAM é acompanhada de grandes desafios e limitações multidisciplinares que as empresas devem enfrentar ao entrar neste mercado. Um dos principais desafios é a decisão quanto à localização dos espaços físicos para as estações de táxi aéreo que deve ser baseada em diferentes critérios, como: (i) demanda de usuários, (ii) disponibilidade de espaço e (iii) viabilidade da operação de infraestruturas local (Rajendran; Zack, 2019).

A escolha das áreas para implantação da infraestrutura da UAM é um aspecto essencial a ser considerado e, nesse sentido, o uso de ferramentas de geoprocessamento associadas à geomática podem ser um importante aliado na determinação da localização dessas áreas. A abordagem *fuzzy* tem sido amplamente utilizada e recomendada como ferramenta de tomada de decisão (Bailey *et al*., 2003). Modelos baseados na lógica *fuzzy* têm sido utilizados para melhorar as probabilidades de estimativas de ocorrência de determinado fenômeno. Associados ao ambiente SIG, os modelos *fuzzy* são capazes de produzir resultados mais precisos e mais próximos da realidade, auxiliando as estratégias de tomada de decisão baseadas e análises multicritérios (Penki, 2022). Assim, a abordagem *fuzzy*, associada a um ambiente SIG, pode auxiliar na escolha das áreas mais favoráveis para a instalação dos *vertiports*. A abordagem *fuzzy* é capaz de fornecer as localizações mais adequados no espaço geográfico tendo como base de entrada dados multivariados.

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo utilizar a lógica *fuzzy* em diferentes cenários para determinar as áreas para a construção da infraestrutura terrestre necessária às operações da UAM, mediante a análise de diferentes critérios. Foram produzidos mapas, considerando diferentes operadores *fuzzy*, indicando as áreas mais favoráveis para instalação de *vertiports* no município de São Paulo.

2. PANORAMA UAM

O congestionamento do tráfego urbano é consequência de fatores como a falta de infraestrutura urbana terrestre necessária para atender a alta densidade populacional, aumento da frota de veículos particulares e do número de passageiros que trafegam em áreas onde o transporte público não atende aos usuários de maneira eficiente (Rajendran & Srinivas, 2020). Na tentativa de minimizar os problemas de congestionamento do tráfego urbano e melhorar a mobilidade dos passageiros, novas formas de transporte estão sendo desenvolvidas, como no

caso da UAM (Rajendran; Zack, 2019; Rajendran; Srinivas, 2020).

A UAM é uma nova alternativa de transporte considerado seguro, eficiente e sustentável, que pode ser feito por aeronaves e sistemas aeronáuticos tripulados e não tripulados. Este novo conceito de transporte tornou-se possível a partir do desenvolvimento de novas tecnologias e conceitos da aviação (Paul; De Lorenzo; Cordioli, 2020; Thipphavong *et al*., 2018; Vascik & Hansman, 2018). Considerando os sistemas propulsivos, os *eVTOLs* podem apresentar diferentes configurações de propulsão.

Devido os *eVTOLs* apresentarem diferentes configurações, Synodinos; *et al.* (2017) e Candeloro *et al.* (2019) destacam que há certa dificuldade no uso de ferramentas que auxiliem no estudo da predição da intensidade do ruído e seus impactos. No entanto, Grandl *et al*. (2018) ressaltam que, independentemente da configuraçãp, os *eVTOLs* trarão grande melhoria quanto ao nível de ruídos, uma vez que são aeronaves elétricas. Contudo, é importante destacar que, de modo geral, a implantação da UAM enfrentará importantes desafios. Além dos fatores associados ao desenvolvimento dos *eVTOLs*, como por exemplo a intensidade de ruído, há também desafios quanto a infraestrutura necessária às operações bem como a escolha dessas áreas para construção dessa infraestrutura.

Rajendran e Zack (2019) destacam que para determinar o tipo de infraestrutura relacionada ao transporte aéreo urbano deve-se considerar o potencial do local a fim de acomodar novos usuários bem como de outras demandas latentes que podem se derivar à medida que o sistema UAM se desenvolva. Os estudos de Lineberger *et al.* (2019) e Grandl *et al.* (2018) ressaltam que um dos fatores importantes para o sucesso da UAM está associado ao planejamento e à implementação da infraestrutura de solo necessária. A infraestrutura terrestre exigirá uma avaliação abrangente e um projeto integrado às condições individuas de cada cidade, além de ser necessário considerar um conceito de integração entre espaço aéreo e a infraestrutura dos *vertiports* (Federal Aviation Administration, 2012).

De acordo com um estudo da EASA (2022), os projetos de infraestrutura dos *vertiports* necessitarão contar com uma ação colaborativa das empresas fabricantes dos *eVTOL*s. Essas empresas deverão fornecer informações e requisitos para que sejam definidas as especificidades dos *vertiports.* Tais informações incluiriam a dimensão do *eVTOL*, forma, configuração, comprimento, largura, dimensão D[1], peso máximo de decolagem, requisitos de movimentação em solo para taxiar e estacionar as aeronaves, dentre outros.

O documento da EASA (2022) elenca especificações importantes acerca da infraestrutura de um *vertiport*. Tais especificidades incluem as características físicas dos *vertiports*, como por exemplo uma possível proteção lateral para minimizar os efeitos do deslocamento de ar nos pousos e decolagens, configuração da pista de taxiamento (se necessário). O documento destaca a importância de analisar distâncias seguras de possíveis obstáculos para pouso e decolagem das aeronaves. O estudo da EASA (2022) pode ainda ser um importante ponto de partida para a consolidação da infraestrutura necessária para as operações da UAM. Além disso, pode ser um importante balizador para a seleção de áreas mais propensas para a instalação e construção dos *vertiports*.

3. ABORDAGEM *FUZZY* PARA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

O processo de análise multicritério utilizando a abordagem *fuzzy multilayer* combina diversas entradas e fornece resultados cujas fronteiras das classes não são bem definidas. Burrough (1998) recomenda a utilização dessa abordagem para fenômenos ambivalentes em modelos matemáticos ou conceituais. Diferentemente da teoria clássica de conjuntos, onde a função de pertinência é defina como falsa ou verdadeira, o grau de pertinência *fuzzy* e expresso em escala contínua que varia de 0 a1. Assim, no processo de seleção de sítios aeroportuários por exemplo, valores mais próximos de 1 representam regiões mais adequadas para a escolha do sítio, e os valores mais próximos de 0 as regiões menos adequadas. Esta abordagem tem sido usada para escolha de sítios aeroportuários, como por exemplo no estudo de Jiang e Wang (2014) e Qiao; Zhang (2018).

[1] Dimensão D: diâmetro da menor circunferência que envolve a projeção do *eVTOL* no plano horizontal (EASA, 2022).

3.1. Lógica e operadores *fuzzy*

Burrough (1998) define que a função de pertinência para os conjuntos *fuzzy* deve garantir que o grau de pertinência máximo seja igual 1 no centro do conjunto. As regiões de fronteiras são representadas pelos valores próximos de 0. O ponto onde o grau de pertinência se aproxima de 0.5 é chamado de ponto de crossover. Há várias funções de pertinência que podem ser utilizadas na determinação de um valor de pertinência nas bordas de um conjunto *fuzzy*, dentre elas a linear, sigmoide e a quadrática, mais comumente utilizadas em plataformas SIG.

Assim como nos conjuntos Booleanos, na abordagem *fuzzy* os dados podem ser manipulados utilizando métodos lógicos de combinação de dados. Diversos operadores podem ser utilizados de forma a se obter um mapa resultante da sobreposição dos mapas (dados) de entrada. Dentre esses operados, pode-se citar o *fuzzy* AND, *fuzzy* OR, Soma Algébrica, Produto Algébrico e o operador GAMMA.

O *fuzzy* AND funciona como a lógica da intersecção e equivale ao AND booleano. Assim, o mapa resultante conterá os o conjunto de valores mínimos de todos os mapas sobrepostos. O operador OR segue a lógica de uma operação de união e funciona como o OR booleano. Assim, o mapa resultante armazenará os valores máximos dos mapas de entrada. O operador Soma Algébrica representa a soma dos valores dos mapas de entrada. Assim, o mapa resultante será a soma dos valores de cada mapa de entrada. O operador de Produto Algébrico representa a multiplicação dos valores dos mapas de entrada. Assim, o mapa resultante será resultado da multiplicação dos valores dos mapas de entrada. O operador GAMMA inclui o produto entre a Soma Algébrica *fuzzy* e o Produto Algébrico *fuzzy*, elevado a um expoente, chamado de GAMMA. Assim, quando γ é igual a 1, o resultado será o mesmo que a Soma Algébrica *fuzzy* e quando GAMMA for igual a 0 o resultado é equivalente ao Produto Algébrico *fuzzy*. A Equação 1 define a lógica *fuzzy* empregada.

$$\textit{fuzzy} = (\text{Soma Algébrica } \textit{fuzzy})^{\gamma} * (\text{Produto Algébrico } \textit{fuzzy})^{1-\gamma} \quad (1)$$

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo

A área selecionada para estudo é o município de São Paulo – SP que de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), possui área territorial de aproximadamente 1.521,110km², população estimada para o ano de 2021 de 12.396.372 pessoas, densidade demográfica de 7.398,26hab/km² e Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), em 2010, de 0,805. A seleção deste município se deu por conta de este ser uma grande região metropolitana com vários desafios associados ao tráfego urbano intenso de veículos terrestres e ao alto adensamento populacional. Essas características tornam o município de São Paulo um potencial candidato a ser um possível polo gerador de demanda para as operações da UAM.

4.2. Dados

Os dados utilizados no presente estudo foram obtidos de fontes diversas como por exemplo, Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Prefeitura Municipal de São Paulo (GEOSAMPA), IBGE, entre outras fontes. O conjunto de dados iniciais e suas respectivas fontes pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 Base de dados

Categoria	*Dado*	*Fonte*
Acesso	Localização dos helipontos	ANAC (2021)
	Localização das estações de metrô	GEOSAMPA (2021)
	Localização das estações de trem	GEOSAMPA (2021)
	Localização das estações de ônibus	GEOSAMPA (2021)
	Ciclovias	GEOSAMPA (2021)
	Localização dos edifícios mais altos	GEOSAMPA (2021)

Espaço aéreo	Localização de destino de resíduos	CETESB (2021)
	Rota de migração de AVES	ICMBIO (2021)
	Rotas Especiais de Aeronaves (REA)	DECEA (2021)
Demanda	Renda/domicílio	IBGE (2010)
	Densidade demográfica	IBGE (2010)

A seleção dos dados iniciais foi pautada, principalmente, na relação em que cada dado possui com o fenômeno estudado. Por exemplo, os dados de localização dos helipontos foram selecionados devido a possibilidade de utilização da infraestrutura destes já existentes. Os dados de localização das estações de metrô, trem, ônibus e malha ciclo viária foram escolhidos pela necessidade de integração da UAM com os modais existentes. Os dados de rotas de migração de aves e localização de destino de resíduos foram selecionados, pois a presença de aves em espaços aéreos representa um grande desafio e, portanto, essas áreas devem ser evitadas. É importante ressaltar que as áreas de destino de resíduos são atrativas para aves. Os dados de rotas especiais de aeronaves foram escolhidos, pois as operações dos espaços aéreos devem ser separadas para garantir a segurança das operações. Por fim, os dados de renda e densidade demográfica foram selecionados, pois estes dados podem funcionar como uma proxy de demanda pelos serviços que serão oferecidos pela UAM.

4.3. Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos incluem três etapas principais. A primeira consiste na obtenção e seleção de dados e no pré-processamento para sua compatibilização e organização do banco de dados. A etapa de seleção é bastante importante, pois inclui dados de fontes diversas e, portanto, é necessário a verificação da qualidade dos dados selecionados. A segunda etapa consiste na realização de medições objetivas no Sistema de Informação Geográfica envolvendo os helipontos e as variáveis independentes. Por exemplo, foi medida a distância entre cada heliponto e a estação de metrô mais próxima, entre cada heliponto e a estação de trem mais próxima, e assim por diante. A terceira etapa consiste no cruzamento de todas as vaiáveis utilizando diferentes operadores *fuzzy* para obtenção das regiões mais propensas a instalação dos *vertiports*.

A obtenção das variáreis contou com diferentes operadores disponíveis por meio da obtenção de medidas objetivas disponíveis no Sistema de Informações Geográficas. Foram obtidas inicialmente variáveis de diferentes fontes de dados, utilizando diferentes operadores. O processo de obtenção das variáveis está detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 Descrição dos dados, formato e operadores para obtenção das variáveis.

Dado	Formato	Operador	Variável
Localização dos edifícios mais altos	Vetor de pontos	Densidade de Kernel de pontos	Densidade de Kernel das edificações maiores que 20m.
Renda/domicílio	Vetor de polígonos (setores censitários)	Agregação	Renda domicílio
Densidade demográfica	Vetor de polígonos (setores censitários)	Agregação	Densidade demográfica
Ciclovias	Vetor de linhas	Distância euclidiana	Distância de ciclovias
Localização de destino de resíduos	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância de destino de resíduos
Rota de migração de aves	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância de rotas de migração de aves
Rotas Especiais de Aeronaves (REA)	Vetor de polígonos	Distância euclidiana	Distância de rotas especiais
Localização das estações de metrô	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância de estações de metrô

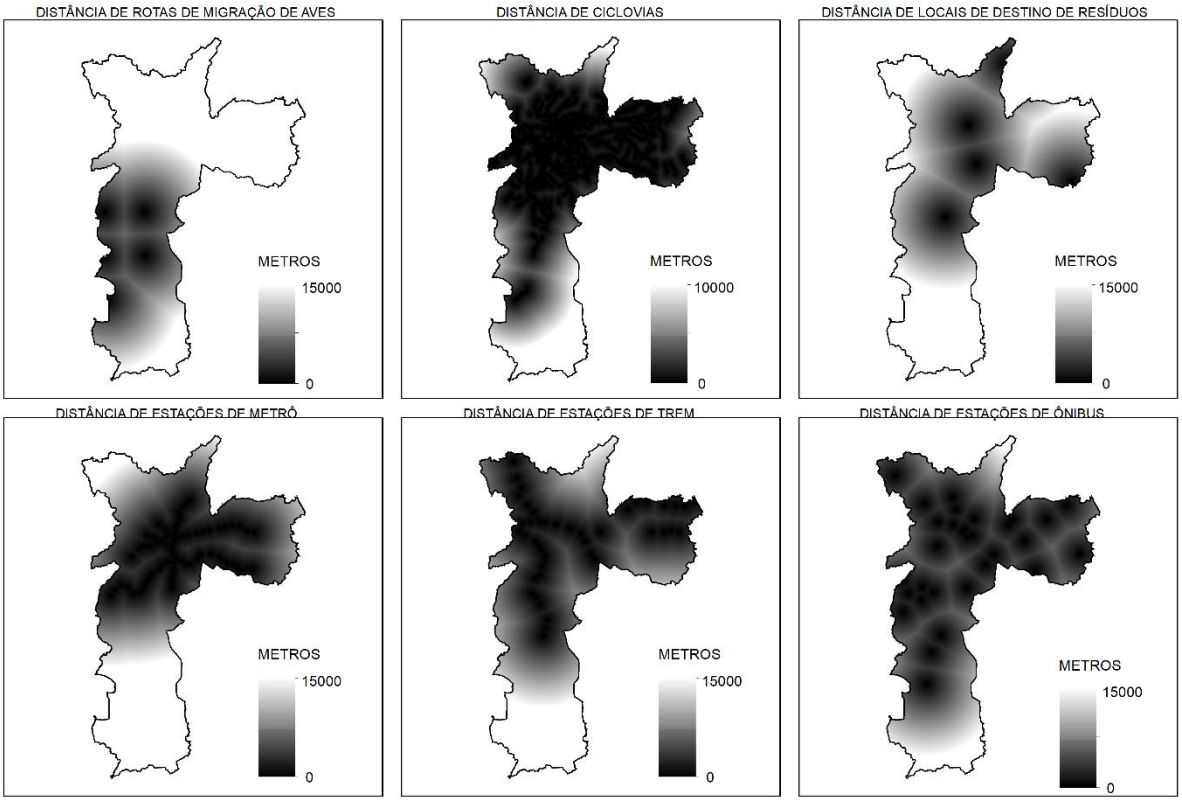
Localização das estações de trem	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância de estações de trem
Localização das estações de ônibus	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância de estações de ônibus
Localização das estações de metrô e helipontos	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância entre helipontos e estação de metrô mais próxima
Localização das estações de trem e helipontos	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância entre helipontos e estação de trem mais próxima
Localização das estações de ônibus e helipontos	Vetor de pontos	Distância euclidiana	Distância entre helipontos e estação de ônibus mais próxima

A Tabela 2 apresenta o conjunto de variáveis utilizadas. As variáveis possuem relação direta ou inversa com o fenômeno estudado. As variáveis de distâncias de estações de metrô, trem, ônibus, bem como as variáveis de distância entre helipontos e essas estações, ciclovias, densidade demográfica, renda e densidade de Kernel das edificações possuem relação direta, pois quanto mais próximo dessas áreas, mais favorável será à instalação de um *vertiport***.** As demais variáveis possuem relação inversa, ou seja, quanto mais distante dessas áreas, mais favorável é determinado local à instalação de *vertiport.*

Após a obtenção das variáveis, aplicou-se um operador *fuzzy* linear para reescalonamento do valor das variáveis. Assim todas elas ficaram com valores entre 0 e 1. Após, foi aplicado diferentes operadores *fuzzy* para a obtenção das regiões mais e menos favoráveis para instalação dos *vertiports*. Ao todo, foram aplicados cinco operadores: *fuzzy* AND, *fuzzy* OR, *fuzzy* Soma Algébrica, *fuzzy* Produto Algébrico e *fuzzy* GAMMA. Para o operado GAMMA foram utilizados três expoentes: 0,2, 0,5 e 0,9.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a aplicação das medidas objetivas aos dados no ambiente SIG, foram obtidas as variáveis para cruzamento por meio dos operadores *fuzzy*. Como visto, ao todo, foram obtidas 13 variáveis originais, que podem ser observadas na Figura 1


DISTÂNCIA DE ROTAS DE MIGRAÇÃO DE AVES
METROS
15000
0
DISTÂNCIA DE CICLOVIAS
METROS
10000
0
DISTÂNCIA DE LOCAIS DE DESTINO DE RESÍDUOS
METROS
15000
0
DISTÂNCIA DE ESTAÇÕES DE METRÔ
METROS
15000
0
DISTÂNCIA DE ESTAÇÕES DE TREM
METROS
15000
0
DISTÂNCIA DE ESTAÇÕES DE ÔNIBUS
METROS
15000
0

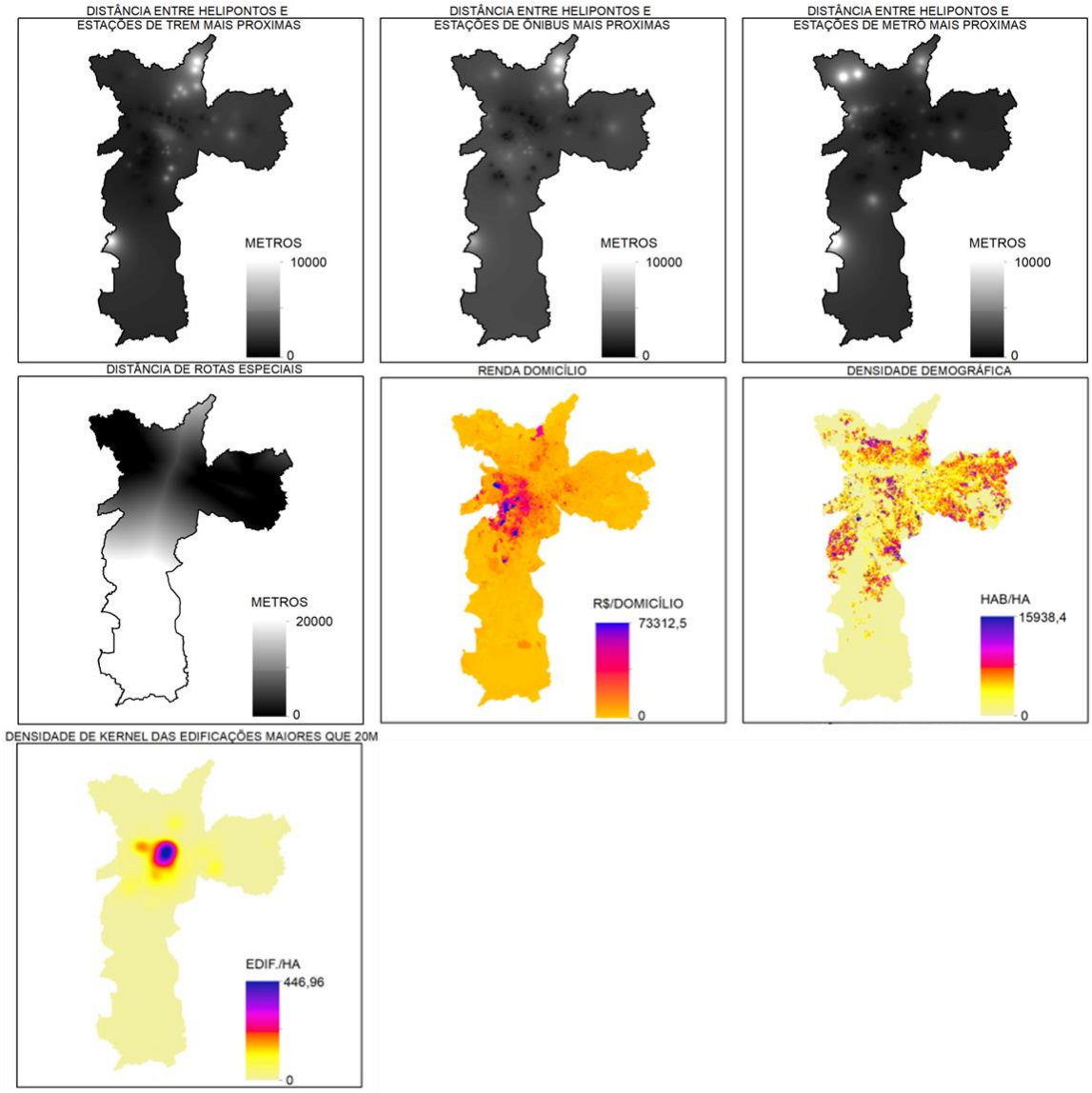


Figura 1 Conjunto de variáveis independentes originais selecionadas para o estudo

A Figura 1 apresenta o conjunto inicial de variáveis selecionadas onde, em cada mapa é demonstrado o range da métrica que os respectivos mapas expressam. Por exemplo, nos mapas de distância, como os de distância das estações de metrô, trem e ônibus, quanto mais escuro a cor no mapa, menor a distância, em metros, de tais estações. O oposto também é verdadeiro, ou seja, quanto mais clara a cor no mapa, maior a distância, em metros. Já nos mapas de Densidade de Kernel, quanto mais azul for a cor no mapa, maior a densidade de pontos do fenômeno representado. Por fim, no mapa que representa a variável renda/domicílio, quanto mais azul for a cor no mapa, maior é a renda/domicílio naquela região.

Após a obtenção das variáveis originais, aplicou-se um operador *fuzzy* linear para transformar os valores das variáveis originais para que estas tivessem seu range entre zero e um. Em seguida, aplicou-se os operadores *fuzzy* para obtenção das áreas mais propensas à instalação dos *vertiports*. Essas áreas podem ser melhor observadas na Figura 2.

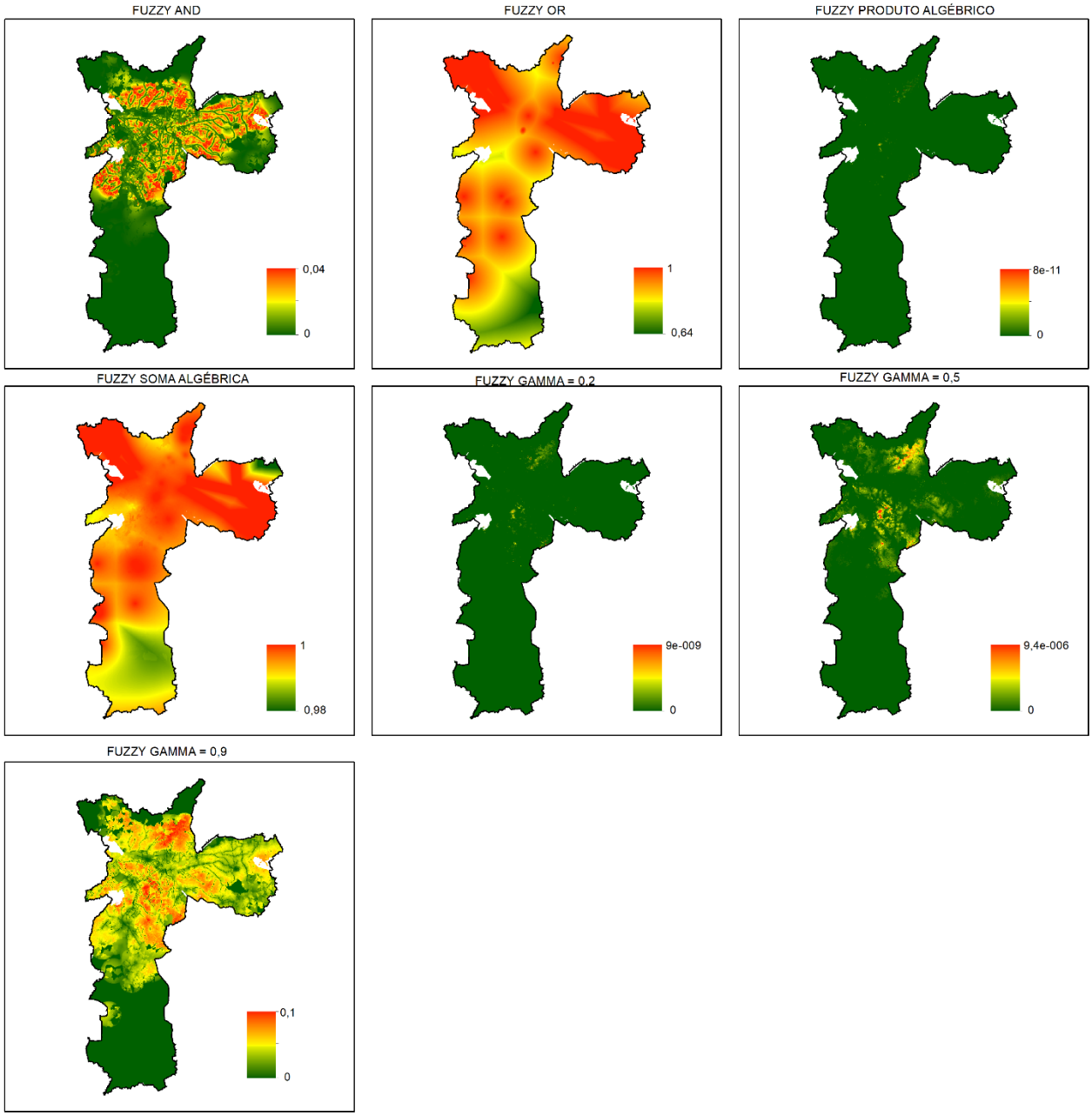


Figura 2 Áreas mais propensas a instalação dos *vertiports* de acordo com cada operador *fuzzy*

A análise da Figura 2 revela que há diferença significativa entre os resultados gerados por cada operador. Por exemplo, o operador AND gerou áreas mais favoráveis na região central do município com valores bem baixos, próximos de zero. Este fato pode ser explicado dada a natureza do operador, que coleta sempre os valores mínimos de cada variável, resultado em um cenário mais conservador, ou seja, gera uma menor extensão de áreas favoráveis à instalação (regiões com valores mais próximos de 1). O Operador OR e o operador Soma Algébrica têm comportamento oposto. Esses operadores geram resultados menos conservadores, ou seja, geram extensões territoriais maiores de áreas mais favoráveis à instalação dos *vertiports*. Isto ocorre pois o operador OR trabalha sempre com os valores máximos de cada variável de entrada, e o Soma Algébrica trabalha com a soma destes valores, gerando um maior número de regiões com valores mais próximos de 1.

O oposto ocorre com o operador de Produto Algébrico, que gerou o cenário mais conservador dentre todos os estudados. Este operador gerou pouquíssimas áreas favoráveis à instalação dos *vertiports*. Este fato está associado ao fator multiplicativo dos valores dos pixels dos dados de entrada, gerando um

mapa de saída com valores muito baixos (próximos de 0). No operador GAMMA, pode observar cenários mais versáteis, variando de acordo com o expoente GAMMA. Os resultados se aproximam daqueles obtidos nos operadores Produto Algébrico a medida em que se diminui o valor do expoente GAMMA e, quando se aumenta o valor do expoente, o resultado se aproxima daquele obtido pelo operador Soma Algébrica.

Independente do operador utilizado, é consenso entre quase todos os resultados que as áreas mais favoráveis se encontram na região central do município de São Paulo. Este fato pode estar associado principalmente pelo maior adensamento populacional, pelo maior número de estações de trem e metrô e pela maior quantidade de estações de ônibus existentes nesta região. Há também a tendência do apontamento de áreas mais favoráveis na zona leste, outra região bastante adensada do município. Outro consenso entre todos os resultados é que não há regiões favoráveis para instalação de *vertiports* no extremo da zona sul do município, podendo ser justificado pela ausência de urbanização e infraestrutura urbana nesta região.

Assim, os operadores *fuzzy* se mostram uma alternativa interessante para auxiliar a tomada de decisão baseada em análises multicritérios. O mais interessante dessa abordagem é a sua versatilidade, podendo gerar vários tipos de cenários, do mais pro menos conservador, dependendo do objetivo de cada estudo. Isto permite identificar tendências espaciais que podem ser observadas nos diversos resultados gerados pelos diversos operadores. É importante ressaltar que não existe o mapa correto ou incorreto, o método serve para explorar os dados de entrada e a análise dos dados de saída devem ser interpretados com cautela, sendo utilizado principalmente para exclusão de áreas menos interessantes para o objetivo do fenômeno estudado. Por exemplo, no caso de instalação de *vertiports*, fica evidente que não há pouca aptidão para operações da UAM no extremo da zona sul e os resultados indicam que tais operações devem se concentrar na zona central, norte e leste do município.

6. CONCLUSÃO

É possível concluir que a utilização da abordagem *fuzzy* pode contribuir positivamente na identificação de áreas favoráveis à instalação de *vertiports* no município de São Paulo. Os diferentes operadores utilizados por meio do *fuzzy* resultaram em cenários distintos para o fenômeno estudado. Alguns cenários mais favoráveis como por exemplo, com o operador AND que apresentou resultado com maior favorabilidade à instalação de *vertiports* sobretudo em áreas localizadas na região central do município. Os cenários cujos operadores utilizados foram OR e Soma Algébrica apresentaram maiores extensões de áreas territoriais favoráveis à instalação de *vertiports*. Já o operador Produto Algébrico apresentou o cenário mais conservador dentre todos os estudados.

O estudo concluiu ainda que, mesmo com diferentes operadores e resultados, a abordagem *fuzzy* foi capaz de identificar áreas favoráveis à instalação de *vertiports* e que essas áreas se encontram em grande parte na região central, seguida das regiões norte e leste do município de São Paulo. É importante destacar que, o estudo não identificou áreas exatas para instalação de *vertiports*, mas indicando quais são as áreas mais favoráveis e excluindo as áreas menos favoráveis à instalação de *vertiports*. Vale ressaltar ainda que, não é possível definir qual dos operadores é o mais adequado sem que exista uma referência para comparação dos resultados. A escolha do operador a ser utilizado dependerá do cenário mais adequado para representação do fenômeno estudado. Desta forma, pode-se considerar que a abordagem *fuzzy* pode ser uma alternativa interessante para auxiliar estudos com essa finalidade.

References

Bailey, D., Goonetilleke, A., & Campbell, D. (2003). A new fuzzy multicriteria evaluation method for group site selection in GIS. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *12*(6), 337–347. https://doi.org/10.1002/mcda.365

Easa. (2022). *Vertiports Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned*

VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN). *March*.

Federal Aviation Administration. (2012). *AC 150/5390-2C - Heliport Design Document Information*. Federal Aviation Administration. https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5390-2

Grandl, G., Ostgathe, M., Cachay, J., Doppler, S., Salib, J., & Ross, H. (2018a). The future of vertical mobility. In *7th Asian/Australian Rotorcraft Forum, ARF 2018*. https://www.porsche-consulting.com/en/press/insights/detail/study-the-future-of-vertical-mobility/

Grandl, G., Ostgathe, M., Cachay, J., Doppler, S., Salib, J., & Ross, H. (2018b). The Future of Vertical Mobility. In *Porsche Consulting*. https://fedotov.co/wp-content/uploads/2018/03/Future-of-Vertical-Mobility.pdf

IBGE, I. B. de G. e E. (2020). *Cidades e Estados*. https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-jose-dos-campos.html

Jiang, B., & Wang, Y. (2014). The evaluation of airport site selection based on the multilayer fuzzy reasoning model. *ICLEM 2014: System Planning, Supply Chain Management, and Safety - Proceedings of the 2014 International Conference of Logistics Engineering and Management*, 836–841. https://doi.org/10.1061/9780784413753.126

Lineberger, R., Hussain, A., Metcalfe, M., & Rutgers, V. (2019). *Infraestructure barriers to the elevated future of mobility*. Deloitte Insights. https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html

Paolo, C., Tiziano, P., & Ragni, D. (2019). Small Scale Rotor Aeroacousitcs for Drone Propulsion : a Review of Noise Sources and Control Strategies. *Engineering*.

Paul, S., de Lorenzo, M., & Cordioli, J. A. (2020). Considerações iniciais sobre a regulamentação de ruído para aeronaves eVTOL. *Acústica e Vibrações*, *52*(September).

Penki, R. (2022). Application of Geographical Information System- Based Analytical Hierarchy Process Modeling for Flood Susceptibility Mapping of Krishna District in Andhra Pradesh. *Research Square*, 1–23.

Qiao, L., & Zhang, L. (2018). *Evaluation of General Airport Site Selection Based on Synthetic Weighting Method and Grey Fuzzy Theory*. *199*(Saeme), 244–251. https://doi.org/10.2991/saeme-18.2018.45

Rajendran, S., & Srinivas, S. (2020). Air taxi service for urban mobility: A critical review of recent developments, future challenges, and opportunities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *143*(September), 102090. https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102090

Rajendran, S., & Zack, J. (2019). Insights on strategic air taxi network infrastructure locations using an iterative constrained clustering approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *128*(January), 470–505. https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.06.003

Synodinos, A., Self, R., & Torija, A. (2017). Noise assessment of aircraft with distributed electric propulsion using a new noise estimation framework. *24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017*.

Thipphavong, D. P., Apaza, R. D., Barmore, B. E., Battiste, V., Belcastro, C. M., Burian, B. K., Dao, Q. V., Feary, M. S., Go, S., Goodrich, K. H., Homola, J. R., Idris, H. R., Kopardekar, P. H., Lachter, J. B., Neogi, N. A., Ng, H. K., Oseguera-Lohr, R. M., Patterson, M. D., & Verma, S. A. (2018). Urban air mobility airspace integration concepts and considerations. *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. https://doi.org/10.2514/6.2018-3676

Vascik, P. D., & Hansman, R. J. (2018). Scaling constraints for urban air mobility operations: Air traffic control, ground infrastructure, and noise. *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 1–25. https://doi.org/10.2514/6.2018-3849

MOBILITY-AS-A-SERVICE COMO FACILITADOR DE ACESSO A AEROPORTOS: DESAFIOS E POTENCIAIS

Marilia Pereira Cavalcanti, Mauricio Oliveira de Andrade, Viviane Falcão
Universidade Federal de Pernambuco

*** Corresponding author e-mail address**: mamapcavalcanti@gmail.com

PAPER ID: SIT180

ABSTRACT

Com os avanços tecnológicos, o transporte aéreo tem se tornado cada vez mais acessível. Se por um lado o transporte aéreo assegura deslocamentos em curto espaço de tempo, por outro, muitos aeroportos situam-se afastados das regiões centrais das grandes cidades, o que gera grande demanda de deslocamentos de áreas com maiores densidades demográficas. Pasha e Hickman (2016) destacam que muitos aeroportos são acessíveis por uma diversidade de modos, tais como: carros particulares, táxis, trens, metrô, ônibus, ônibus dedicados, limusines e ônibus de longa distância. No entanto, se esses deslocamentos não forem convenientes, prático, dinêmicos e regulares, além de eficientes em custos e tempos de viagem, podem causar dificuldades aos viajantes. Também a mobilidade nas cidades está mudando, as tecnologias da informação e comunicação têm gerado inovações nos modelos de negócios em mobilidade com diversas funcionalidades. Como evolução dessas alternativas tecnológicas, surgiu na Finlândia, em 2014, o conceito de mobilidade como serviço (Mobility-as-a-Service ou MaaS). O MaaS funciona como integrador das diversas alternativas de meios de transporte públicos ou privados, possibilitando que o usuário planeje, agende e pague sua viagem por meio de um mesmo aplicativo, em sistema de pay-as-you-go ou através de inscrições mensais, economizando tempo e aumentando a praticidade da mobilidade (MELO et al., 2018). Muitas empresas no mundo estão focando no MaaS como uma forma de facilitar os deslocamentos das pessoas. Além disso, estão oferecendo serviços assemelhados ao MaaS para aeroportos. Dentre elas, pode-se citar a SHOTL, a Lyko e a Empresa aérea do Japão, ANA. O objetivo desta pesquisa é analisar como o MaaS está sendo inserido como meio complementar ao transporte aéreo, como as empresas estão oferecendo esses serviços e como pode vir a se tornar um meio de transporte integrado ao transporte aéreo, incluindo os deslocamentos de e para os aeroportos.

Keywords: *Mobility-as-a-Service*, Airport, Access.

ACKNOWLEGDEMENTS

Agradeço aos meus professores e orientadores Maurício e Viviane pelo estímulo de estudar um assunto tão interessante e importante para o setor Aéreo. Agradeço à Capes pelo incentivo a pesquisa. Não poderia deixar de agradecer também o apoio e estímulo do aluno Iago Santana Nunes que me incentiva e encoraja diariamente em busca dos meus objetivos.

1. INTRODUÇÃO

O Transporte Aéreo tem se tornando cada vez mais acessível em todo o mundo devido a avanços tecnológicos que propiciam melhorar sua regularidade, eficiência e segurança.

A qualidade da conectividade aérea depende também das distâncias e da confiabilidade das opções dos acessos terrestres, que representam fatores relevantes na facilitação de viagens turísticas e de negócios (OECD/ITF, 2018).

Parentoni (2010) destaca a importância do fator relativo ao sistema de transportes e à acessibilidade na localização eficiente de um aeroporto.

O modo de transporte mais usual para acesso aos terminais de passageiros nos aeroportos é o rodoviário, mais especificamente o carro como um meio de locomoção. Isso traz como um grande problema, o alto volume de tráfego circulando normalmente a baixas velocidades nos acessos a aeroportos. Esses deslocamentos terrestres dos centros urbanos aos aeroportos podem ser prejudicados por fatores associados a problemas no funcionamento do sistema viário e de transporte público, como congestionamentos, indisponibilidade de serviços e irregularidade na frequência de horários.

Nesse particular sobre o perfil de preferência dos usuários, é importante inicialmente observar que passageiros aéreos representam um mercado que difere dos usuários diários de transporte público. Passageiros de transporte aéreo são normalmente mais sensíveis ao tempo de deslocamento e menos sensíveis aos custos de transporte; carregam suas próprias bagagens, utilizam o transporte público de forma menos frequente e quando o fazem, são mais propícios a usar os serviços fora das horas de pico (MANDLE *et al*., 2000).

A melhora na acessibilidade representa um fator estratégico para aumentar o número de usuários, sendo benéfico também para as companhias aéreas que lá operam. Assim como exemplo aponta-se a competição entre os aeroportos Santos Dumont e Galeão no Rio de Janeiro e entre os aeroportos Congonhas e Guarulhos em São Paulo, sendo os dois primeiros em cada cidade os mais centrais e obviamente como melhores condições de acessibilidade. Essa questão da centralidade é provavelmente responsável por dois terços dos voos domésticos ao Rio de Janeiro estar alocado ao Aeroporto Santos Dumont, que está bem situado em relação à rede de transporte urbano. Essa talvez represente uma das razões da crise do Aeroporto do Galeão, tanto que nas futuras licitações dos dois aeroportos planeja-se levar o metrô até o terminal aéreo (O GLOBO, 2021).

Com relação aos terminais paulistas, há também a separação entre voos internacionais e nacionais, já que Congonhas, com mais fácil acesso ao centro é unicamente nacional. Essa questão da melhor acessibilidade na comparação leva as empresas aéreas a praticarem em média preços 18% mais caros em Congonhas em comparação com voos partindo de Guarulhos (UEDA, 2012).

A mobilidade urbana está mudando, tornando a análise dessa problemática cada vez mais complexa. As tecnologias da informação e comunicação têm gerado inovações nos modelos de negócios em transportes com diversas finalidades.

A evolução dessas tecnologias nos smartphones e na internet móvel propiciou o surgimento de diversos aplicativos que têm se tornado bastante populares nos últimos anos, a exemplo dos serviços por aplicativos prestados por intermediação do *Uber*, 99, *Cabify*, etc. Esses serviços são traduzidos como a nova geração de serviços de compartilhamento de veículos ou *ride-sourcing*, como denominados internacionalmente (MARTINS, 2019).

As alternativas de transporte por aplicativos vêm ganhando cada vez mais ao longo dos anos visibilidade no Brasil e no mundo. A *Uber*, ainda como a principal empresa global, foi fundada em 2010, na cidade de São Francisco, nos Estados Unidos com o propósito expresso em sua comunicação de aproximar pessoas e revolucionar o modo de se movimentar nas cidades. Para uma viagem de carro ou para fazer as compras do supermercado, a *Uber* usa a tecnologia para oferecer às pessoas comodidades a partir de suas demandas em tempo real. Seus serviços chegaram ao Brasil junto com a Copa do

Mundo de Futebol de 2014 e apesar da sua recente entrada no mercado, já conta com mais de 1 milhão de Motoristas/entregadores parceiros e 22 milhões de usuários (UBER, 2020).

Esses serviços além de impactarem nas cidades, estão mudando a forma como as pessoas chegam e saem dos aeroportos. A crescente quantidade de usuários desse tipo de serviço tem levado a discussão sobre seus impactos no âmbito da mobilidade urbana e do desenvolvimento sustentável.

Como evolução dessas alternativas tecnológicas, surgiu na Finlândia, em 2014, o conceito de Mobilidade como Serviço (*Mobility-as-a-Service* ou MaaS). O MaaS funciona como integrador das diversas alternativas de meios de transporte públicos ou privados, possibilitando que o usuário planeje, agende e pague sua viagem por meio de um mesmo aplicativo, em sistema de *pay-as-you-go* ou através de inscrições mensais, economizando tempo e aumentando a praticidade da mobilidade (MELO et al., 2018).

No Brasil essa mobilidade não é difundida. Mas, de acordo com De Oliveira (2021), em uma pesquisa em Recife-PE-Brasil, 83,3% dos respondentes declaram interesse em aderir um possível serviço tipo MaaS.

Além disso, de acordo com Cavalcanti (2021), o MaaS está desde o começo atrelado ao conceito de mobilidade sustentável, visto que uma de suas premissas é a de minimizar o uso do transporte privado, reduzindo as emissões de gases do efeito estufa e aumentando a atratividade do sistema de transporte público da cidade. Ligado também à diminuição do uso do transporte privado está a décima primeira ODS: Cidades e comunidades sustentáveis, que tem como objetivo tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. A meta 11.2 cita que, até 2030, proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos, com especial atenção para as necessidades das pessoas em situação de vulnerabilidade, mulheres, crianças, pessoas com deficiência e idosos. O MaaS pode, neste contexto e através da tecnologia, teoricamente promover a redução do uso do automóvel e maior uso dos transportes públicos e dos meios ativos.

Por ser um fator importante para os aeroportos, pesquisas envolvendo o transporte integrado entre transporte terrestre e aéreo já estão em desenvolvimento, a exemplo do projeto *Door to Door Information for Passengers and Airports* (DORA). Esse projeto com aplicação à União Europeia, visa a concepção e estabelecimento de um sistema de informação integrado e transparente que ajude os passageiros a otimizar seu tempo de viagem desde a origem ao aeroporto de partida, bem como do aeroporto de chegada ao destino final. Assim, o sistema de informação integrado DORA visa à redução do tempo total necessário para uma viagem aérea, incluindo o tempo necessário para o transporte de e para os aeroportos. Uma solução integrada proporcionará consequentemente, para além do valor acrescentado da otimização da viagem, um único ponto de visualização da viagem global eliminando a necessidade de combinar informação (horários de transportes públicos, bilhete e mapas) que tem de ser recolhida pelos viajantes em diferentes e heterogêneas fontes (BAUMGARTNER, 2016).

Muitas empresas no mundo estão focando na mobilidade como um serviço (MaaS) como uma forma de facilitar os deslocamentos dos usuários. Além disso, estão percebendo e oferecendo serviços relacionando o MaaS com acessos a Aeroportos. Dentre elas, pode-se citar a *SHOTL*, a *Lyko* e a Empresa aérea do Japão, *ANA*.

O principal objetivo do artigo está voltado à análise de como o serviço intitulado *Mobility as a Service* (MaaS) está sendo inserido como um meio de complemento aos deslocamentos aéreos. Como as empresas estão oferecendo esses serviços e como pode vir a se tornar um meio de transporte integrado ao transporte aéreo, incluindo os deslocamentos de e para os aeroportos.

A principal motivação do estudo é a falta de pesquisas científicas na área interligando o conceito do MaaS com os Aeroportos e analisando os desafios e os potenciais que essa junção pode trazer para os usuários.

A Figura 1 representa a união do *Mobility as a Service* com o serviço de Transporte Aéreo. O usuário na compra da sua passagem já realiza toda sua logística de deslocamento: Origem ao aeroporto, Aeroporto – Aeroporto e Aeroporto ao destino. Um aplicativo com uma única interface ao usuário com todas as informações e planejamento de sua viagem.



Figura 1 Representação do mobility-as-a-Service com o Transporte Aéreo. Fonte: O autor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mobilidade urbana é um assunto comum no cotidiano das pessoas, o tempo e a qualidade do percurso utilizado para se deslocar de um lugar a outro é de fundamental importância no mundo globalizado de hoje (STRAHER e TEIXEIRA, 2015).

De acordo com Alves e Junior (2009), a mobilidade pode ser englobada como, a facilidade de realizar deslocamentos de bens/cargas quanto de pessoas, em um determinado espaço urbano e a acessibilidade, entretanto, pode ser compreendida como o acesso da sociedade em efetuar deslocamentos e suas próprias atividades.

Na origem e destino aos aeroportos existem, basicamente, duas opções de locomoção: Transportes privados, como *uber*, carros alugados, táxis e transportes de agências ou transporte público, como ônibus, metrô ou trem.

De acordo com Meneguette (2015), a principal desvantagem do transporte público é que geralmente é lento devido ao número de paradas, Inflexibilidade da rota e dos horários e Superlotação a que está sujeito, principalmente nos horários de pico. De acordo com Da Costa (2012), a principal vantagem é que ele apresenta um custo mais barato que os outros meios e facilita a mobilidade do trânsito dentro das cidades.

Por isso, cerca de 85% dos passageiros no Brasil preferem o sistema de serviço privado, conforme dados da secretaria nacional de aviação civil, 2021, informando que esse sistema é mais confiável, velocidade mais rápida de percurso, mais confortável, mais seguro e mais flexível as suas necessidades.

Dados da matriz pesquisa de satisfação do passageiro em aeroportos de 2020, disponibilizada no site *Horus*, contempla a informação sobre o meio de transporte que o passageiro utiliza para se deslocar até o aeroporto, assim como o motivo da viagem do entrevistado. Com os dados obtidos, excluindo o motivo de viagem sendo: trabalho, devido a ser uma viagem mais planejada corporativa, e analisando os meios de transportes usuais para o deslocamento se obtém o Gráfico 1 dos meios de transporte mais usuais para os passageiros se deslocarem até os aeroportos.

Há vários fatores que influenciam a escolha do modo de transporte até o aeroporto. Em se tratando das características das viagens e percursos dos passageiros, um dos fatores importantes é o motivo da viagem. Acredita-se que aqueles passageiros que viajam a turismo geralmente estão mais ansiosos, carregam bagagens mais pesadas ou um número maior delas e utilizam o aeroporto não somente nos horários de pico. Já os passageiros que viajam a negócios utilizam bagagens mais leves ou um número de menor delas, estão mais familiarizados com o ambiente do aeroporto e viajam predominantemente nos horários de pico. Em ambos os casos, um transporte público ineficiente pode implicar na escolha/preferência pelo transporte individual, seja em função do volume e quantidades das bagagens (no caso das viagens turísticas) ou em função do tempo disponível (no caso das viagens de negócio em horários de pico) (DE SOUZA, 2012).

O Gráfico 1 mostra que em 2020 o deslocamento por aplicativos até os aeroportos do Brasil foi o mais utilizado, sendo 40% das viagens realizadas. Seguido como segunda opção o deslocamento por carro particular próprio (16%).

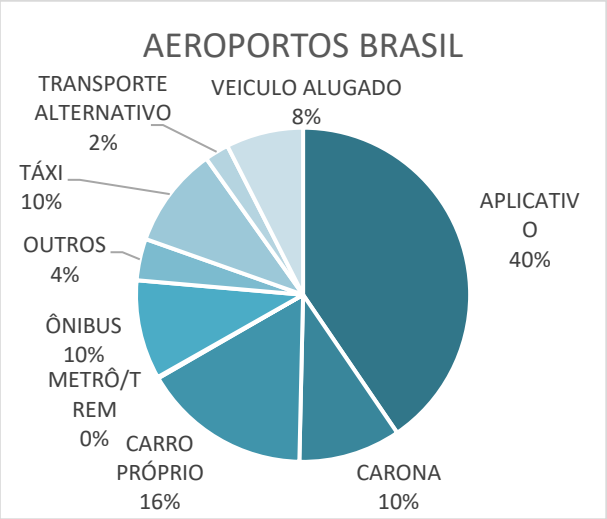


Gráfico 1 Dados de deslocamento dos passageiros para os Aeroportos do Brasil. Fonte: A autora.

Os dados acima mostram o impacto que as viagens realizadas por aplicativos de transporte, também conhecidos por serviços de *ridesourcing*, possuem nos deslocamentos aos aeroportos.

Em São Francisco, onde o serviço de *ridesourcing* surgiu em 2012, o "San Francisco *Transportation Plan* 2040" (SFCTA, 2017) já reconhece o impacto dos serviços de *ridesourcing*. Na época da pesquisa eles realizam cerca de 170 mil viagens por dia na cidade, o que representava 15% do total das viagens. De 2014 a 2016, o número de viagens com origem ou destino no principal aeroporto da cidade realizado por ride-sourcing cresceu seis vezes, o que levou a empresa operadora do metrô a dizer que essa tendência tem impactado no número de usuários do seu sistema. O plano de transportes de São Francisco não prevê ações concretas com relação ao tema, mas planeja executar um plano de estudo para a série de serviços emergentes de mobilidade e tecnologia, com o intuito de avaliar os serviços e desenvolver um conjunto de recomendações políticas, no qual o ride-sourcing estaria incluso. A entrada dessa alternativa de mobilidade não apenas impactou na relação demanda de passageiros dos transportes públicos e particulares, mas também nos serviços de estacionamentos, já que a população está deixando de usar seus carros particulares (MARTINS *et al.*, 2019).

Henao (2019) sugere em seus resultados de pesquisa em Denver, Colorado, que o uso dos aplicativos está substituindo viagens de automóveis e poderia reduzir a procura de estacionamento, em particular em deslocamentos para aeroportos, locais para eventos, restaurantes e bares. Wadud (2020) mostra em sua pesquisa de aeroportos em Nova York que todos os três aeroportos metropolitanos tiveram uma redução estatisticamente significativa no uso de estacionamento desde a introdução dos serviços de *ridesourcing*. A pesquisa, portanto, apoia os achados da literatura de que o surgimento de serviços de carona resultou em uma redução no estacionamento de carros nos aeroportos. Dos três aeroportos, Jonh F. Kennedy (JFK) e Newark (EWR) sofreram uma redução acumulada no número de estacionamentos de 7,46%.

3. ANÁLISES

A análise do conceito *Mobility-as-a-Service* com Aeroportos não é tão difundida na literatura, mas muitas empresas que estão enxergando o potencial dessa união já estão oferecendo o serviço para empresas aeroportuárias. A metodologia da pesquisa é baseada na análise dos desafios e potenciais que essas empresas e a literatura apontam como importantes para a difusão do conceito MaaS nos terminais aéreos.

Entre as empresas, pode-se citar a SHOTL. A *Shotl On-demand Buses* como uma plataforma de mobilidade que combina vários passageiros na mesma direção com uma frota móvel de vans e microônibus. No site que anuncia esse serviço cita-se que os aeroportos tendem a estar localizados longe de áreas residenciais e que embora muitas vezes disponham de ligações por transporte público, essas podem não ser úteis a todos funcionários e passageiros cuja viagem começa ou termina noutro local. A esses usuários ficam as alternativas que necessitam negociar rotas, horários e bilhetes normalmente desconhecidos para os visitantes, como

veículos de baixa ocupação, como carros particulares, táxis ou *ridesourcing*. No entanto, tudo isso pode aumentar os congestionamentos e a poluição. Desse modo, os esforços para reduzir a pegada de carbono geral da aviação devem considerar o cenário maior e olhar a viagem além do próprio aeroporto. A *Shotl* está atualmente fornecendo tecnologia para permitir serviços compartilhados por demanda para funcionários do Aeroporto de Munique - Alemanha, denominados *ShuttleMe* (MARTRET, 2020).

Outra empresa que também está na mesma linha de oferecer serviço MaaS para Aeroportos é a *Lyko*, de Lyon na França. Como contexto a *Lyko* argumenta que os aeroportos tendem a ser localizados longe das áreas residenciais para minimizar a poluição atmosférica e sonora. Em média, a distância entre os centros das cidades e os 10 maiores aeroportos europeus é de 30 quilômetros. Isso resulta em locais de difícil acesso. Assim, graças ao MaaS os aeroportos têm a oportunidade de promover uma mobilidade mais sustentável. Por seus atributos, os usuários detêm a possibilidade de comparar e agendar diferentes meios de transportes, tudo isso em tempo real, ao menor preço e de forma fácil (LYKO, 2021).

Graças a APIs como as da *Lyko*, é possível implantar soluções MaaS com facilidade. Os aeroportos podem assim facilitar as transferências de passageiros de e para os seus locais. De fato, é possível integrar soluções de mobilidade de serviços em seus sites, aplicativos ou mesmo em quiosques interativos. Em termos concretos, uma vez no aeroporto, os passageiros não precisarão mais se conectar ao wifi ou usar 3G/4G. Eles terão acesso 24 horas por dia, 7 dias por semana, a todas as opções de transporte.

Ao adotar uma solução MaaS, um aeroporto poderá fornecer aos usuários acesso a uma ampla gama de opções de transporte. Com a vantagem de poder oferecer viagens de acordo com seus orçamentos e necessidades. No ambiente atual, os aeroportos precisam oferecer aos seus clientes soluções completas de transporte. Como exposto, os hábitos e expectativas dos viajantes estão mudando. A adoção de soluções MaaS certamente ajudará os aeroportos a resolver problemas futuros.

Outra empresa que está investindo nessa união *Mobility-as-a-service* e Aeroportos é a Empresa aérea do Japão. *ANA* (*All Nippon Airways*). A *ANA* anunciou que pretende melhorar as opções de viagem para os passageiros, oferecendo uma nova funcionalidade de Mobilidade como Serviço (MaaS) em seu aplicativo móvel. A nova função de serviço de navegação chamada "*Airport Access*" oferece aos passageiros uma experiência de viagem que integra informações atualizadas sobre o status do voo e informações de localização para colocar tudo o que os passageiros precisam na ponta dos dedos. O novo serviço permitirá que os passageiros pesquisem de forma rápida e fácil todo o seu itinerário de viagem no Japão, inserindo o local de onde estão viajando e a que horas desejam chegar ao aeroporto (*ANA* vai simplificar viagens ao adicionar opções de Mobilidade como Serviço) (*ANA*, 2020).

Atualmente a *ANA* está promovendo o Universal MaaS para que pessoas com deficiência, idosos, visitantes estrangeiros no Japão e outros que tenham medo de se locomover por algum motivo possam desfrutar de viagens confortáveis e sem estresse. No experimento de verificação, os clientes monitorados inserirão as informações necessárias para obter assistência ao fazer reservas de passagens aéreas pelo site da *ANA*, e as rotas de viagem usando JR *East*, Tokyo Monorail e MK Taxi serão configuradas para corresponder aos voos reservados. Ao compartilhar com antecedência as informações necessárias para a assistência com cada operadora de transporte, os participantes experimentaram a capacidade de fazer os arranjos de uma só vez sem precisar entrar em contato com cada empresa. No dia da viagem, os participantes embarcaram em transporte público em uma rota definida. Os operadores de transporte prestam assistência aos clientes monitorados, sabendo com antecedência a rota, horário e informações de assistência para embarque (ANA, 2022).

4. CONCLUSÕES

A implementação do MaaS como uma tecnologia facilitadora para os passageiros e aeroportos tem uma certa complexidade em sua implementação, uma vez que poucas pesquisas na área são realizadas.

Através das empresas que utilizam ou fornecem o serviço para aeroportos pode-se destacar os potenciais:

- Otimização do tempo de viagem do passageiro;
- Informação completa em tempo real sobre o tráfego e atrasos de voos;
- Manter o passageiro informado ao longo de cada etapa da viagem;
- Satisfação do passageiro na redução do estresse sobre um ambiente desconhecido, contribuindo assim para a atratividade do aeroporto;
- Mudança entre mobilidade de carro individual para o público ou compartilhado, no deslocamento ao aeroporto, reduzindo congestionamentos ao redor do aeroporto;
- Maior sustentabilidade em virtude da troca do carro individual no deslocamento de e para o aeroporto;
- Um aeroporto poderá fornecer aos usuários acesso a uma ampla gama de opções de transporte. Com a vantagem de poder oferecer viagens de acordo com seus orçamentos e necessidades;
- Os usuários dos transportes aéreos quando chegam ao aeroporto de destino necessitam negociar rotas, horários e bilhetes normalmente desconhecidos para eles, causando assim um estresse ao passageiro. Com o MaaS isso não aconteceria mais.

É importante destacar também que os seguintes desafios impactam no aceite e na integração do MaaS com os aeroportos:

- Integração do passageiro com uma plataforma mais complexa que oferece todos os serviços em uma única interface;
- Múltiplos operadores de transportes envolvidos. As integrações precisam ser claras, objetivas e regulamentadas;
- Cada Aeroporto/empresa aérea vai ter sua plataforma diferente? O usuário vai ter que baixar vários aplicativos para ter acesso aos serviços? Uma forma de solução são os chamados *Instant* app que fornecem o serviço sem ocupar a memória do telefone;

Além de ser um conceito de mobilidade que atrai facilidade aos seus passageiros, pode-se notar que o MaaS traz muitas vantagens em sua aplicabilidade. Sendo um grande aliado das empresas aéreas e dos aeroportos.

References

Alves, P., & Junior, A. R. (2009). Mobilidade e acessibilidade urbanas sustentáveis: a gestão da mobilidade no Brasil. *Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana-PPGEU/Universidade Federal de São Carlos-UFSCar. São Paulo*.

ANA, 2020. ANA to simplify travel by adding Mobility as a Service options to app. Disponível em: https://www.futuretravelexperience.com/2020/03/ana-to-simplify-travel-by-adding-mobility-as-a-service-options-to-app/#:~:text=ANA%20to%20simplify%20travel%20by%20adding%20Mobility%20as%20a%20Service%20options%20to%20app,-Wayfinding%20%26%20Passenger%20Services&text=The%20new%20navigation%20service%20function,location%20information%20among%20other%20features.

ANA, 2022. Universal MaaS: Toward the realization of traveling assistance services for wheelchair users "Arrangement for seamless assistance". Disponível em: https://www.ana.co.jp/en/us/offers-and-announcements/ana-future-promise/human-rights-2022-03-22-01/

Baumgartner, C., Kätker, J., & Tura, N. (2016). DORA–integration of air transport in overall urban and regional mobility information. *Transportation Research Procedia*, *14*, 3238-3246.

Cavalcanti, M. P., Monteiro, G. C. L., De Andrade, M. O. (2021) Mobility-as-a-Service (MaaS): condições para se atingir uma mobilidade mais sustentável. Libro de Actas XXI Clatpu. Pag 693 à 703.

Da Costa, D. C. T., & De Neufville, R. (2012). Designing efficient taxi pickup operations at airports. Transportation research record, 2300(1), 91-99.

De Melo, R. R., De Andrade, M. O., Brasileiro, A. (2018). Mobility as a service: necessidade de regulação e papel dos atores relevantes no contexto brasileiro. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET.

De Souza, A. A., & Pereira, A. C. C. (2012). Critérios que influenciam na escolha dos modos de transporte nos deslocamentos ao aeroporto.

Henao, A. and Marshall, W.E. 2019. The impact of ride hailing on parking (and vice versa). Journal of Transport and Land Use. 12, 1 (Feb. 2019). DOI:https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1392.

Lyko, 2020. How can MaaS facilitate travel to and from airports? Disponível em: https://lyko.blog/en/how-can-maas-facilitate-travel-to-and-from-airports/.

Mandle Peter B.; Mansel, Douglas M.; Coogan, Matthew A. Use of public transportation by airport passengers, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board · January 2000. DOI: 10.3141/1703-11.

Martins, D. L., Meira, H., Maia, M. L. A., & Brasileiro, A. (2019). Análise sobre o impacto dos aplicativos de ridesourcing nas ações dos planos de mobilidade urbana. In Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET (Vol. 33).

Martret, G. Mobility-as-a-Service takes off at airports. Disponivel em: https://shotl.com/news/mobility-as-a-service-takes-off-at-airports.

Meneguette, R. I., Geraldo Filho, P. R., Bittencourt, L. F., Ueyama, J., Krishnamachari, B., & Villas, L. A. (2015, July). Enhancing intelligence in inter-vehicle communications to detect and reduce congestion in urban centers. In 2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC) (pp. 1-6). IEEE.

OECD/ITF. (2018). Surface access to airports: the case of Mexico City's new international airport. Disponível em: https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/surface-access-airports.pdf

O Globo. (2021, 09 de dezembro). Santos Dumont e construir metrô até a Ilha do Governador para 'salvar' Galeão. Acesso em 01 jul. De 2022, de https://revistaferroviaria.com.br/2021/12/

Parentoni, E. M. M., & Pacheco, R. R. (2010). Utilização do modelo fcd–fatores criticos de decisão em problemas de localização na construção de um novo aeroporto.

Pasha, M. M., & Hickman, M. (2016). Airport ground accessibility: Review and assessment. In 38th Australasian Transport Research Forum (ATRF 2016).

Straher, G. A., Teixeira, E. H. de S. de B. (2015) Análise da escolha do usuário de aeroporto em virtude da melhora do sistema de transporte público: estudo de caso no aeroporto santos dumont. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET.

UBER (2020). Fatos e dados sobre a Uber. Disponível em: https://www.uber.com/pt-BR/newsroom/fatos-e-dados-sobre-uber/ . Acesso em 05 abr. 2022.

Ueda, T. V. A. Partir do aeroporto de Congonhas é mais caro que de Guarulhos? Um estudo econométrico dos preços das passagens aéreas. Journal of Transport Literature Vol. 6, n. 3, pp. 121-135, Jul 2012

Anomaly detection in approach operations at Sao Paulo/Guarulhos International Airport

Lucas Coelho e Silva*, Mayara Condé Rocha Murça
Aeronautics Institute of Technology (ITA), Civil Engineering Department (IEI)

*** Corresponding author e-mail adress:** coelho@ita.br

PAPER ID: SIT231

ABSTRACT

The pursuit of stringent targets on operational safety and efficiency in an increasingly complex aviation system has been driving the development of novel analytics capabilities for more proactive aviation performance management. Anomaly detection in flight operations data is a prominent approach to delivering actionable information, as anomalies are often related to critical safety events or inefficient operations. In this paper, we apply machine learning techniques to aircraft surveillance data for offline anomaly detection and explanation in approach operations at Sao Paulo/Guarulhos International Airport (SBGR). First, we build an autoencoder classifier for the automatic identification of anomalous approach performance from flight trajectory data. Then, we extend our analysis with runway configuration and weather information to develop models for anomaly explanation. We found that the autoencoder classifier was able to detect operationally relevant anomalies, while the explanatory models provided novel insights about contributing factors to the anomalies identified. We learned that anomalous flight trajectories are more likely to be associated with landing operations on runway 27 under wind scenarios, with an increase in the odds ratio of 63% and 48% for tailwinds and headwinds, respectively. In addition, we also observed a positive association between anomalies and wind gusts situations.

Keywords: Air traffic management, Aviation safety, Anomaly detection, Trajectory data analytics, Machine learning.

1 INTRODUCTION

Over the past years, anomaly detection initiatives with flight operations data, be it airplane sensor data or Air Traffic Management (ATM) system data, have become more prominent, driven mainly by the safety-oriented culture in aviation and the pursuit of improved operational efficiency in an increasingly complex and evolved airspace. Anomalies are patterns on data inconsistent with the expected behavior (Chandola et al., 2009). They arise in non-normal flight situations and operations, and they are often related to conditions that may lead to unsafe scenarios or generate inefficiencies in the airspace. In this sense, the modeling and discovery of anomalies shed light on hazardous or inefficient operations and substantiate the development of new safety and operational policies and practices for airlines and ATM.

Previous research has mostly focused on the development of anomaly detection models with various statistical learning techniques, without addressing explanatory aspects regarding anomalous situations. On the other hand, the explanation of machine learning models across different fields has been deemed of significant importance as a way to provide trust and improved usability in autonomous decision-making systems (Degas et al., 2022).

In this paper, we apply machine learning techniques to aircraft surveillance data for offline anomaly detection and explanation in approach operations at Sao Paulo/Guarulhos International Airport (SBGR). First, we build an autoencoder classifier for the automatic identification of anomalous approach performance from flight trajectory data. Then, we extend our analysis with runway configuration and weather information to develop models for anomaly explanation. The autoencoder classifier was able to detect operationally relevant anomalies, while the explanatory models provided novel insights about contributing factors to the anomalies identified.

This paper is organized in the following way: Section 2 reviews the related literature while discussing current gaps, and Section 3 presents the methodological approach for modeling and identifying anomalies in our particular case. Section 4 presents and discusses the results, and Section 5 details the conclusions.

2 BACKGROUND AND LITERATURE REVIEW

2.1. Anomaly detection

Anomaly detection refers to the process of identifying valid and practically significant data structures incompatible with a notion of expected normal behavior. Within flight operations, the aviation subsystem that deals with the day-to-day operations of flights, in which the principal stakeholders are Air Traffic Management (ATM) and airlines/aircraft operators, anomaly detection initiatives are often related to the investigation of safety or efficiency-related issues. In this sense, the objects of interest are often operation-wise qualities that interfere in the system behavior, such as aircraft trajectories, from the ATM standpoint; or the identification of safety-related events and the unveiling of new hazards in the case of airlines. Nevertheless, the analytical techniques are often shared with anomaly detection approaches for condition monitoring and proactive maintenance of the airframe and engine, thence we include some of those efforts in our literature assessment.

The anomaly detection process is frequently classified in terms of the timeframes of the statistical learning process and model operation. First, the modeling process itself can happen offline, when the model training uses historical data on a batch processing schema, or online, often referred to as incremental learning, in which the statistical learning model gets updated as new data become available without the need to retrieve the previously used data. Second, the model operation itself can also be distinguished between the online and offline approaches. For the offline model operation approach, the anomaly detection process happens after the operations occur. For the online approach, on the other hand, the anomaly detection process happens in a real-time, streaming fashion as the operations develop. Finally, it is possible to have an offline learning model designed for online model operations, so as to construct an online/incremental learning ap-

proach that aids in offline model operations.

There are several approaches for formulating an anomaly detection problem as well as algorithms and techniques suitable for modeling it, and Chandola et al. (2009) presents a thorough general review. The anomaly detection problem does not have a universal solution, applicable to all cases. In practice, the existing techniques solve specific formulations of the general problem (Chandola et al., 2009). Over the literature, one finds several categories of anomaly detection methods, models, and tools. Here, we discuss the methods applicable to our methodological approach: reconstruction methods, and isolation methods.

Reconstruction methods rely on models that learn how to reconstruct normal data. When the model fails to reconstruct an observation - defined by comparing the reconstruction error to a previously tuned threshold -, that observation is considered an anomaly. Autoencoders, a particular type of neural network architecture, are commonly used within the reconstruction methods.

Isolation methods aim at separating an instance from the rest. It measures the susceptibility of each instance to be isolated, with the anomalies being those more easily isolated, based on the principle that anomalies are few and different than normal instances (Liu et al., 2008, 2012). The approach relies on a binary tree structure that isolates every instance via a recursive and random partitioning process that generates a path length metric for isolating each instance. By averaging the path lengths produced by several trees, one can identify anomalies corresponding to the shortest paths.

2.2. Anomaly detection in flight operations

One of the first initiatives for anomaly detection applied to the ATM domain is that of Matthews et al. (2013), in which the authors presented an approach for discovering operationally significant anomalies in flight track data generated from surveillance equipment. It is an extension of the studies in the Flight Operations Quality Assurance (FOQA) domain to ATM data conducted by Das et al. (2010), as it leverages the Multi-Kernel Anomaly Detection (MKAD) algorithm presented by the latter. The algorithm identified approximately 40 anomalous flights, which were then further analyzed. Domain experts confirmed operationally significant anomalies in 15 of these flights.

A different line of study is that of Murça (2018), which discusses anomaly detection via Conformal Prediction for identifying non-conforming trajectories within the proposed framework for characterization of air traffic flows based on flight trajectory data. The Conformal Prediction model presented better values for recall, precision, and F1-score when compared to K-Nearest Neighbors (KNN) and Gaussian Mixture Model (GMM).

On another approach, Deshmukh & Hwang (2019) presented TempAD, an unsupervised learning algorithm that uses temporal logic for anomaly detection for terminal airspace operations. It generates normal-flight parameter intervals that are easily interpreted and converted to natural language. Subsequently, Deshmukh et al. (2019) leverage the identified normal-flight parameter intervals and discuss an approach to identify precursors for the detected anomalies in surveillance data for terminal airspace operations. For that, the authors presented a supervised learning algorithm for precursor detection, Reactive TempAD.

Another effort is that of Olive & Basora (2019), which presented a methodology to analyze flight track data from Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and identify operationally significant anomalies. The authors obtained the principal flows in the airspace via trajectory clustering and used autoencoders for identifying anomalies.

While current literature discusses different scenarios in which anomaly detection is viable within the ATM context, it still lacks anomaly explanation efforts that could provide novel insights about contributing factors to the anomalies identified, in addition to providing trust and improved usability in autonomous systems. Furthermore, with the ongoing development of machine learning models and techniques, there are still opportunities for applying novel or previously unexplored modeling approaches with proper com-

parison to baseline methods or current practice. With the unprecedented application of isolation forests for anomaly detection in arrival trajectories, we contribute to the exploration of different modeling approaches for anomaly detection formulations with flight track data, while addressing their explanation to shed light on potential causal factors for the anomalies identified.

3 METHODOLOGICAL APPROACH

In this paper, we first conduct an offline anomaly detection learning process based on flight tracking ADS-B data regarding terminal airspace arrival operations at the Sao Paulo/Guarulhos International Airport (SBGR). Then, we augment our analysis with runway configuration and weather information to develop models for anomaly explanation. In this sense, our objective is to replicate a scenario in which the goal is the post-operation discovery of anomalous operations.

For this problem, we use two model categories for anomaly detection. First, we apply an Isolation Forest model for the unsupervised discovery of potential anomalies. Then, we train an autoencoder based solely on the normal flights. By calibrating an allowable reconstruction error threshold for normal operations, the model is able to classify between normal and anomalous instances. Based on the identified anomalies, we then build the explanatory models based on support contextual data and obtain metrics of feature importance.

3.1. Datasets

The flight tracking ADS-B dataset features 10,209 flights between December 31, 2019, and January 31, 2020, at the Sao Paulo/Guarulhos International Airport (SBGR). It presents the flight information in a time series from which we extracted the following parameters along with each flight:

- Record timestamp;
- Latitude;
- Longitude;
- Altitude;
- Speed;
- Whether the record takes place in the terminal manoeuvring area.

Figure 1 depicts the horizontal trajectories of the analyzed flights.

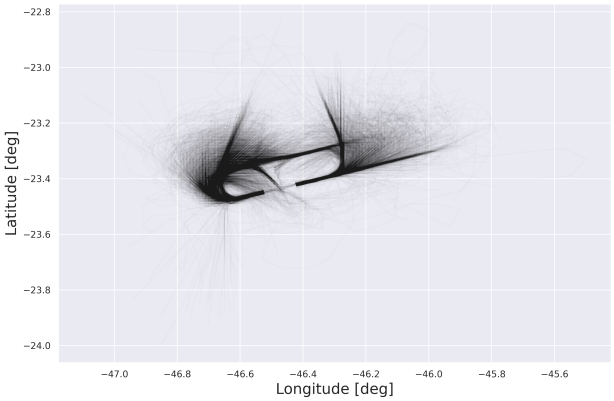


Figure 1 Horizontal trajectories of terminal airspace arrival operations at SBGR between December 31, 2019 and January 31, 2020.

The Meteorological Aerodrome Report (METAR) dataset contains information regarding winds, gusts, flight rules, presence of thunderstorms and so forth, for the same period.

To emulate the online model operation after training, we partition the data set temporally on the day which results in an approximately 80-20 data split. We use the first portion for training the anomaly detection models offline and the final 20% for replicating the model usage during real operations.

3.2. Anomaly detection

Model conception starts with the specification of a shared data-wrangling phase, common to both models. In this case study, we analyze approach procedures in SBGR terminal airspace, from 10,000 ft onwards. To ensure data consistency with the desired flight phase and scale, the wrangling processing subjects the flights through three filters. First, it narrows down the trajectories to the subsets within terminal airspace. Second, we discard all observations previous to the first instant a given flight reached 10,000 ft. To avoid climbing flights following a takeoff captured by the surveillance equipment, we also ensure a minimum value for the rate of descent. Finally, to avoid flights with few samples, we keep only the flights with more than five observations. The result of the wrangling phase is a set of flights in the

desired scale and context for the development of the models.

Unsupervised learning: Isolation Forest For the preliminary anomaly discovery phase, we construct an unsupervised model using an Isolation Forest, or iForest. The goal is to obtain an initial distinction between normal and anomalous flights. Based on this categorization, the training process of the supervised model then considers only the flights labeled as normal.

For the application of the Isolation Forest model, we calculate summarizing metrics instead of directly using the wrangled time-series data for model building. There is thus an extra step comprising the transformation of the wrangled time-series data into the tabular metrics. For each flight, we obtain the following flight-wise summarizing metrics:

- Specific Total Energy (STE)'s total, average, and standard deviation;
- Specific Potential Energy Rate (SPER)'s total, average, and standard deviation;
- Specific Kinetic Energy (SKE)'s total, average, and standard deviation;
- Total time in terminal airspace;
- Latitude at 10000 ft;
- Longitude at 10000 ft;
- Last recorded latitude;
- Last recorded longitude;
- The total distance flown in terminal airspace;
- Hour of the day at the entrance in terminal airspace;
- Hour of the day at the exit of terminal airspace.

Based on the modeled data, we fit an Isolation Forest with 500 trees. Section 4.1. discusses the results.

Supervised learning: autoencoder For the supervised learning process, we train an autoencoder classifier. Autoencoders are a particular type of neural network architecture used for learning representation of data via reconstruction. It does so by encoding the data into a different feature space - also referred to as a compressed representation - before decoding it back to the original space. The underlying assumption in this approach is that if one successfully trains a model to reconstruct normal flights only, the execution of this model in an anomalous flight would result in a higher reconstruction error, enabling the classification of the flight as an anomalous instance.

As in the iForest training, the starting point is the wrangled time-series data. Instead of constructing summarizing metrics from the data, however, as performed in the Isolation Forest model training, the goal here is to use a representation as close as possible to the sequential data. Among the parameters available, we select those representatives of the aircraft trajectory and positioning: latitude, longitude, altitude, heading, and speed.

Nevertheless, one of the challenges of anomaly detection in the aviation domain is the varying number of samples between each flight. This property of the data often requires preprocessing steps that resample and reshape the data, which is the case for the application of the autoencoder. Therefore, to unify data dimensions, we resample the time series of each individual flight with a fixed number of observations. The next step is to transform the time series of the four parameters into a single high-dimensional vector. To achieve this, we rearrange the data interspersedly. Each flight can be represented in the high dimensional space as a vector of the following shape:

$$x = [p_{0_{t_0}}, p_{1_{t_0}}, ..., p_{n_{t_0}}, ..., p_{0_{t_m}}, p_{1_{t_m}}, ..., p_{n_{t_m}}]$$

where n is the number of parameters p and m is the number of time instances t.

Finally, the data goes through a scaling process. The scaling process contributes to the proper assessment of feature importance by the autoencoder neural network structure. The data is scaled via the Robust Scaler. It centers the data by removing the median and scales the result based on a specified quantile range, making the scaling process robust to outliers. Since the autoencoder models the behavior of normal flights, the contamination of the training data set with anomalous flights becomes relevant. The Robust Scaler

is used precisely to tackle these effects of data set contamination.

The training process of the autoencoder classifier relies on two fundamental steps. The first step concerns the development of a suitable neural network architecture capable of reconstructing the data with a low reconstruction error - in this case, the squared error between the norm of the actual flight vector and the one predicted by the autoencoder. The second training aspect refers to the definition of a reconstruction error threshold that enables classification between normal and anomalous instances.

For training a suitable neural network architecture, we further subdivide the normal data set - as flagged by the Isolation Forest model - into training and validation subsets at an 80:20 ratio.

The autoencoder neural network architecture consists of five hidden layers of 500, 300, 2, 300, and 500 neurons, respectively. For each hidden layer, we use the Rectified Linear Unit (ReLU) activation function. The neural network model was built on top of the open-source machine library scikit-learn, written in Python (Pedregosa et al., 2011). Hyperparameter tuning was not required as a simple neural network configuration sufficed for reconstructing the normal data.

For defining the reconstruction error threshold, the model performance metrics are evaluated under the expected operational context. As a reference, we assume the expected number of daily flights as 500 and a capacity constraint of being able to investigate ten flagged anomalies in the same period. Section 4 discusses the results regarding the anomaly detectioin model.

3.3. Anomaly explanation

Based on the class labels - anomalous or normal - obtained for each flight during model operation, our next goal is to investigate the relationship between the operational context to the identified class. For that, we build two explainable classifiers (logistic regression and random forests) that predict the anomalous quality of a flight, as per identified by the autoencoder, in accordance to operational information extracted from METAR data and from the surveillance data itself.

For each flight assessed during the model operation phase - hence 20% of the original data set - we process the corresponding METAR information to obtain data on visibility, thunderstorms, flight rules, wind gusts, and cross and aligned wind components referenced to the runway, the latter inferred via the heading parameter on the surveillance data set. Based on the wrangled support data, we explore two supervised learning classifiers: a random forests classifier, and a logistic regression classifier. For both modeling approaches, we divide the data set into train and test subsets for validating the modeling process in terms of the model capability of predicting the anomaly class of a flight given the operational context. Because the anomaly classification problem is an imbalanced one, we weigh the models referenced to the class given the heuristics proposed by King & Zeng (2001). After validating the modeling process regarding the accuracy and recall on the test subset, we fit the models on the complete data set and explore the explanatory metrics.

For the random forests classifier, the goal is to assess feature importance to understand the operational factors contributing to the model predictions. We construct a random forests classifier with 500 trees using a split rule based on the Gini impurity, maximum depth of 15 and 3 as the number of predictors randomly sampled as split candidates. Then, we compute the importance metrics - in terms of mean decrease in impurity for each feature - and their standard deviations based on the values of each tree within the forest.

For the logistic regression classifier, we first augment the wrangled support data with features regarding the interaction terms between each operational factor. After fitting the model, we then analyze the coefficients of the independent variables to assess the changes in the odds ratio for each operational term.

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Anomaly detection model training

The Isolation Forest trained with 500 trees identified 669 anomalies within the 8073 flights selected for model training - approximately 8.3%

of the data. Figure 2 presents the two principal components of the evaluated data, obtained via Principal Component Analysis (PCA), hued by the operation category as identified by the Isolation Forest.

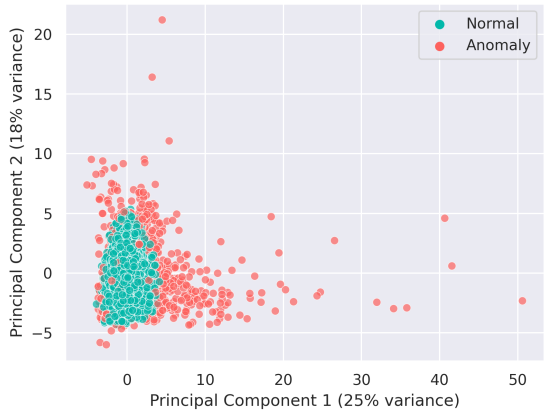


Figure 2 Principal components, hued by the operation category (normal/anomalous).

Based on the flights labeled as normal by the forest, the autoencoder anomaly detector was trained. We assess its reconstruction error for the training and validation subsets, as well as for the flights flagged as anomalous by the Isolation Forest, as shown in Figure 3. The figure also shows that the reconstruction error distribution of the flights in the training and validation subsets are similar, indicating the model did not overfit the data. In addition, there is a statistically significant difference between the error distribution for the normal data and the ones labeled as anomalous, with higher reconstruction error values in the latter. This indicates that the model did not underfit the data and learned a distinction between normal and anomalous instances.

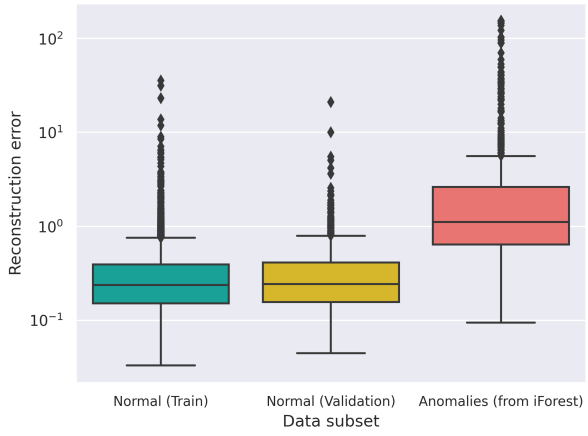


Figure 3 Boxplot of the autoencoder reconstruction errors.

Performance metric evaluation happens via bootstrapping. We first calculate the reconstruction errors for observations in the training, validation, and iForest-flagged anomalies subsets. Next, we define a range of candidate thresholds. For each potential threshold value, we sample, with replacement, 500 flights and evaluate the number of flagged anomalies and the value for each performance metric. Figure 4 shows the results when experimenting 500 times for each potential threshold. It displays the value for recall, precision, F1-Score, and false positive rate (FPR) for each threshold value. The solid lines represent the mean value for the performance metrics, while each shaded region covers the average $\pm$ one standard deviation. Additionally, the green line presents the average number of flagged anomalies per 500 flights, given a threshold.

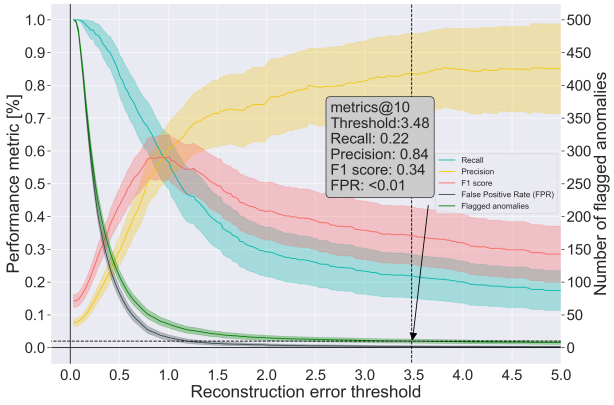


Figure 4 Autoencoder performance metrics obtained via bootstrapping in 500 rounds, considering 500 landings per day and processing capacity of k=10 flagged anomalies.

The selected threshold value was the one that resulted in, on average, ten flagged anomalies per 500 flights - i.e., the analysis capacity in this proposed scenario. Finally, given this threshold of 3.48, we calculate the metrics of 0.22 for recall, 0.84 for precision, 0.34 for F1-score, and a false positive rate of less than 0.01.

4.2. Anomaly detection model operation

For replicating the model usage during real operations, we use the 20% of the flights originally set apart and hence did not go through any processing step during model conception, as discussed in Section 3.1.

Out of the 2136 flights, the autoencoder classifier flagged 47 - or 2.20% - as potentially anomalous, throughout the seven days of operation. Figure 5 displays the number of flagged

anomalies per day.

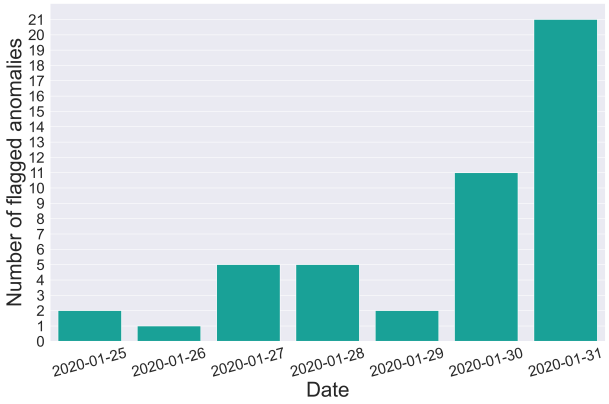


Figure 5 Number of flagged anomalies by the autoencoder during simulated model operation.

Figure 6 highlights the horizontal profiles of three flights flagged as potentially anomalous by the autoencoder. We see that the flights are indeed associated with operationally relevant scenarios that can impact safety/efficiency, presenting either a holding pattern or multiple landing attempts. This is reinforced by Figure 7, which displays the vertical profiles of the same flights along the 95th percentile region shaded in gray.

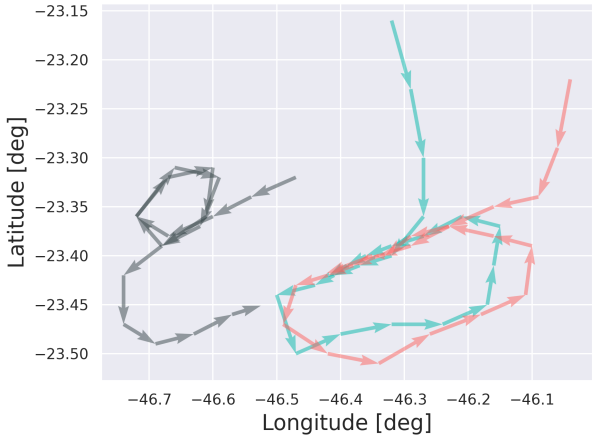


Figure 6 Horizontal profile of three flights flagged as anomalous by the autoencoder.

4.3. Anomaly explanation

To assess the performance of the explanatory models, we first consider the confusion matrices as well as the metrics of accuracy and recall. Table 1 displays the confusion matrix for the random forests classifier, with an accuracy of 0.86 and a recall of 0.75. Table 2 displays the confusion matrix for the logistic regression classifier, with an accuracy of 0.71 and a recall of 0.62. Both results indicate that the explanatory models were able to link anomalous situations to the environmental and contextual conditions.

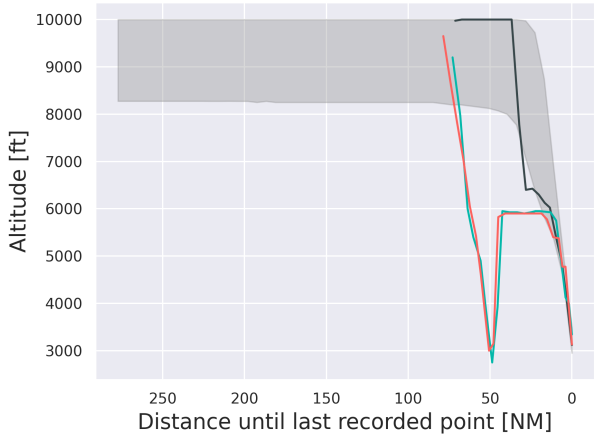


Figure 7 Vertical profile of three flights flagged as anomalous by the autoencoder.

Table 1 Random forests classifier confusion matrix.

		Prediction		
		Normal	**Anomalous**	**Total**
Actual	**Normal**	1800	289	2089
	Anomalous	12	35	47
	Total	1812	324	

Table 2 Logistic regression classifier confusion matrix.

		Prediction		
		Normal	**Anomalous**	**Total**
Actual	**Normal**	1481	608	2089
	Anomalous	18	29	47
	Total	1499	637	

In terms of assessing the contributing factors for the anomalous scenarios, we first evaluate the feature importance metrics regarding the random forests classifier, as shown in Figure 8. The cross-component of the wind, the headwind, and the tailwind values are the top three features contributing to the predictions of the model beyond the reference dashed line of equally contributing features.

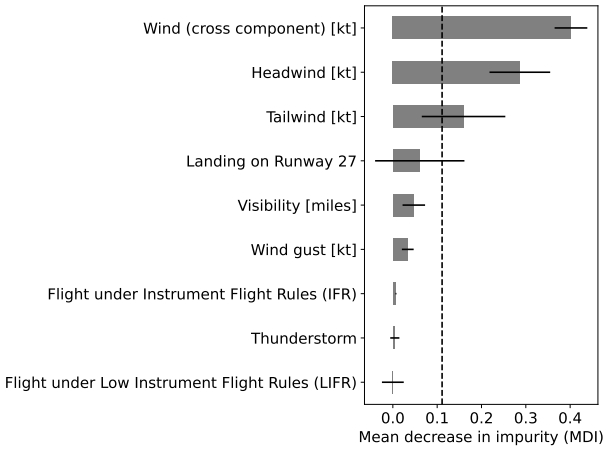


Figure 8 Random forest classifier feature importances.

After evaluating the feature importance of the random forests classifier, we analyze the logistic regression model coefficients in terms of percent change in the odds ratio, as shown in Figure 9. According to the values, we learn that the anomalous situations are associated with landing operations on runway 27 under wind scenarios, with an increase in the odds ratio of 63% and 48% for tailwinds and headwinds, respectively. In addition, we also see a positive association between anomalous scenarios and wind gusts and also thunderstorms accompanied by wind gusts. On the other hand, flights under Instrument Flight Rules (IFR) and increased visibility with flights under IFR showed a reduction in the odds ratio.

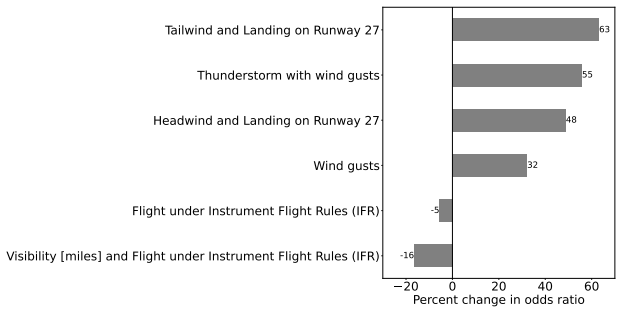


Figure 9 Percent change in the odds ratio for selected parameters of the logistic regression model.

The constructed pipeline demonstrates its applicability regarding the objective of post-operation detection of anomalous approach performance as well as discovery of contributing factors to anomalies. From the operational perspective, the results contribute to the development of novel capabilities that can support performance analysis and monitoring processes, which in turn may be used in training programs or aid in subsequent developments of operational procedures. The pipeline enables efficient highlighting of flights that deviate from normality. In addition, it does so without resorting to a previous mapping of what to look for: operationally relevant scenarios surfaced without the need to resort to heuristic rules that specify every possible case.

5 CONCLUSION

In this paper, we explored the development of machine learning models for anomaly detection and explanation in flight operations trajectory data based on aircraft surveillance data regarding approach operations at Sao Paulo/Guarulhos International Airport (SBGR). We considered first an autoencoder classifier for the identification of anomalous approach performance from flight trajectory data, trained according to normal flights labeled by an Isolation Forest unsupervised learner. Subsequently, the analysis was extended with runway configuration and weather information to develop models for anomaly explanation.

The autoencoder anomaly detector was able to detect operationally relevant anomalies, such as holding patterns and go-around maneuvers. Additionally, the construction of explanatory logistic regression and random forests classification models enabled the association of anomalous situations with operational factors. For instance, we learned that the anomalous situations are more likely to be associated with landing operations on runway 27 under wind scenarios, with an increase in the odds ratio of 63% and 48% for tailwinds and headwinds, respectively.

For future work, there is a need for extending tools that support the evaluation of potentially anomalous flight, such as the explanatory approach provided in this paper, with the assessment of the indication correctness while aiding the discovery process of unknown hazards in the data. Finally, another research direction is the development of online models for the real-time identification of anomalies from flight track data.

References

Chandola, V., Banerjee, A. & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey, ACM Computing Surveys 41(3), 58.

URL: *http://doi.acm.org/10.1145/1541880.1541882*

Das, S., Matthews, B. L., Srivastava, A. N. & Oza, N. C. (2010). Multiple kernel learning for heterogeneous anomaly detection: algorithm and aviation safety case study, KDD '10: Proceedings of the 16th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data miningpp. 47–56.

Degas, A., Islam, M. R., Hurter, C., Barua, S., Rahman, H., Poudel, M., Ruscio, D., Ahmed, M. U., Begum, S., Rahman, M. A., Bonelli, S., Cartocci, G., Di Flumeri, G., Borghini, G., Babiloni, F. & Aricó, P. (2022). A Survey on Artificial Intelligence (AI) and eXplainable AI in Air Traffic Management: Current Trends and Development with Future Research Trajectory, Applied Sciences 12(3), 1295.
URL: *https://www.mdpi.com/2076-3417/12/3/1295*

Deshmukh, R. & Hwang, I. (2019). Anomaly Detection Using Temporal Logic Based Learning for Terminal Airspace Operations . AIAA Scitech 2019 Forum, American Institute of Aeronautics and Astronautics San Diego, California.
URL: *https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2019-0682*

Deshmukh, R., Sun, D. & Hwang, I. (2019). Data-Driven Precursor Detection Algorithm for Terminal Airspace Operations, Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019)p. 7.

King, G. & Zeng, L. (2001). Logistic regression in rare events data, Political Analysis 9, 137–163.

Liu, F. T., Ting, K. M. & Zhou, Z.-H. (2008). Isolation Forest . 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, IEEE Pisa, Italy pp. 413–422.
URL: *http://ieeexplore.ieee.org/document/4781136/*

Liu, F. T., Ting, K. M. & Zhou, Z.-H. (2012). Isolation-Based Anomaly Detection, ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data 6(1), 1–39.
URL: *https://dl.acm.org/doi/10.1145/2133360.2133363*

Matthews, B., Srivsatava, A. N., Schade, J., Schleicher, D. R., Chan, K., Gutterud, R. & Kiniry, M. (2013). Discovery of Abnormal Flight Patterns in Flight Track Data . 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics Los Angeles, CA.
URL: *http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2013-4386*

Murça, M. C. R. (2018). Data-driven modeling of air traffic flows for advanced Air Traffic Management Thesis Massachusetts Institute of Technology, Accepted: 2019-02-14T15:22:40Z.
URL: *https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/120378*

Olive, X. & Basora, L. (2019). Identifying Anomalies in past en-route Trajectories with Clustering and Anomaly Detection Methods, Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019)p. 11.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M. & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python, Journal of Machine Learning Research 12, 2825–2830.

BAGGAGE FEES AND THEIR EFFECTS ON AIR TRANSPORT DEMAND: AN EMPIRICAL STUDY ON TRANSPORT MODE SUBSTITUTION EFFECT

Bruno Felipe de Oliveira, Giovanna Miceli Ronzani Borille, Alessandro Vinícius Marques de Oliveira
Aeronautics Institute of Technology

*** Corresponding author e-mail address**: bfelipeoliveira@outlook.com

PAPER ID: SIT189

ABSTRACT

Due to the fierce competition between airlines in the air transport industry, many of them are turning to the unbundling strategy as a way to increase their competitiveness. Unbundling in the airline industry is the act of dividing the fundamental transportation service from ancillary services, such as checked baggage. In this way, airlines can keep their airfares in check to attract price-sensitive passengers who may not make use of ancillary services. While this strategy proved to be successful for airlines, as it also represents a new revenue source for them, studies show that passengers are unhappy with this trend in the airline industry. In this context, this paper aims to examine the effects of baggage fee implementation on passenger demand by analyzing the case of the Brazilian airline industry, which implemented that policy in 2017. We use a Fixed-Effect regression model to analyze data from 2016-2018 to investigate if and how the baggage fee policy has affected the demand for domestic flights in Brazil. Our results show that the baggage fee implementation in the Brazilian airline industry caused a short-term decrease in overall passenger demand. Moreover, our results also indicate that neither leisure nor business passengers are explicitly affected by this policy. That is, the decrease in the number of passengers was generalized, and cannot be attributed only to the leisure or business segment of passengers. Finally, our results suggest that passengers who have previously traveled between city pairs by car are more likely to stop flying because of baggage fees, thus providing evidence of a substitution effect in the transport sector.

Keywords: Airline industry, Baggage fees, Passenger demand, Substitution effect, Regression.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001; the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), code 2020-06851; and the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), code 305439/2021-9. The authors wish to thank Carolina Silva Ansélmo; all of the participants of the course IT-210/2021; and the reviewers of SITRAER 2022 for their comments towards the improvement of the paper. All of the mistakes are ours.

1. INTRODUCTION

One of the reasons why the civil aviation market is extremely dynamic is due to the fierce competition between airlines since the industry's deregulation. The earliest airline industry deregulation occurred in 1978 in the US. In the first 30 years after the liberalization, passengers in that market see airfares decline by 41.2% in real terms, which experts attribute to the increased market penetration of low-cost carriers and the increased use of the internet to buy tickets (Garrow et al., 2012). Even with the sharp decline in ticket prices after the deregulation, passengers today can still experience a continuous reduction in airfares due to the highly competitive aspect of the civil aviation sector. For example, in the period between 1993 and 2019, the US airline industry saw an average yearly decrease in airfares of 2.3% in real terms, with tickets costing 37.6% less in 2019 when compared to 1993 (BTS, 2022).

Another reason that explains the dynamicity of the airline industry is how the airlines' profitability is heavily affected by external factors in the sector. In this regard, in the past decades, we had a series of worldwide events that challenged airlines – such as the 9/11 attacks, several sanitary crises (SARS in 2003, H1N1 in 2009, and COVID-19 in 2020), global financial crisis, economic recessions, and oil price shocks. Because of the financial pressure caused by factors both within and outside the civil aviation sector, airlines and regulators have started an unbundling trend in the industry to keep airfares in check (Garrow et al., 2012).

In general, unbundling is the act of dividing a product or a service into separate elements and selling them individually, each one at a different price. In the airline market, this trend has divided the fundamental service of air transportation from other services considered additional or ancillary, the latter being the term formally used in the civil aviation industry. Examples of ancillary services are: checked and excess baggage, pre-assigned seats, priority boarding, in-flight entertainment, in-flight internet access, and food & beverage. With this strategy, airlines can keep their airfares low enough to attract price-sensitive passengers. With unbundling, the base ticket price only covers the fundamental air transport service, so if passengers wish for additional services such as checked baggage, they have to pay an extra fee on top of the base ticket price. This strategy proved to be successful for airlines, as ancillary fees allowed them to explore an extremely valuable source of revenue and increase their financial performance. (Warnock-Smith et al., 2017).

While airlines view the unbundling trend as something positive, customers in the industry have an opposite perception. Public opinion during the implementation of baggage fees in the US was skeptical about whether it would reduce airfares for passengers, or if it would be yet another way for airlines to profit. Studies, such as Tuzovic et al. (2014) and O'Connell & Warnock-Smith (2017), further confirmed customer acceptability issues regarding the ongoing unbundling trend and ancillary fees in the airline industry, raising concern about whether they would affect flight demand or induce substitution effect from air travel to other modes.

In this context, this paper analyzes the case of baggage fee policy implementation in the Brazilian civil aviation industry. Up until 2016 that market was still regulated in terms of baggage allowances, which mandated airlines to check for free one 23kg baggage for domestic flights and two 32kg baggage for international flights. In December 2016, the Brazilian National Civil Aviation Agency (ANAC) announced a series of regulatory changes to the Brazilian airline industry, which included the introduction of baggage fees. This announcement was ill-received by the population, skeptics that the proposed change would reduce ticket prices. Their skepticism was partially supported by Barros Jr et al. (2021), which showed that while the introduction of baggage fees in Brazilian civil aviation has reduced the average ticket price, its implementation had also increased the average total price (i.e., ticket price + checked baggage fee) in the period analyzed.

In this context, this paper has the objective to analyze the effects of baggage fee introduction on passenger demand. To do so,

we employ a regression model to analyze the Brazilian domestic airline industry data from 2016 to 2018 - one year before and one year after the introduction of baggage fees in that country.

Besides investigating the effects of the policy on demand, we have a secondary objective to analyze whether baggage fees affected leisure passengers more than business passengers, due to the former commonly flying with more baggage and being more price-sensitive. Although Scotti & Dresner (2015) and Yazdi et al. (2017) have partially analyzed the effects of baggage fees on demand, their study focused more on analyzing and discussing the effects of the policy introduction on ticket prices and airline on-time performance. Thus, we posit that further investigation into the effects of the baggage fee policy on demand is needed, specifically to investigate what segment of passengers is most affected by baggage fees. In this context, one of the contributions of this paper is to expand the literature on the effects of baggage fees on demand by analyzing if there is any association between baggage fees with a decrease in demand from leisure passengers.

We also aim to explore another segmentation of passengers and analyze those who have previously traveled by car or bus (i.e., road transport) between city pairs. Our goal here is to investigate whether the implementation of baggage fees in the airline industry caused a substitution effect, with passengers deciding to stop flying and start driving to their destination. Although the substitution effect is not a novelty topic in the transport literature, studies have mostly focused on analyzing the interaction between high-speed rail and air transport (Givoni & Dobruszkes, 2013; D'Alfonso et al., 2015; Castillo-Manzano et al., 2015; Albalate & Fageda, 2016; Zhang et al., 2018; Bergantino & Madio, 2020). Regarding the specific interaction between the road and the air transport system, Borhan et al. (2017) have briefly examined this issue through a survey study to predict car drivers' intention to use low-cost airlines in Libya. Apart from this study, the literature on the road-air transport substitution effect is relatively scarce. Thus, another contribution of this paper is to empirically analyze whether the introduction of a policy such as baggage fees can cause a substitution effect in the transport sector, specifically between road and air transport.

2. LITERATURE REVIEW

This section presents and discusses the previous studies on the topic of ancillary fees and their acceptability by passengers and the effects of baggage fee policies in the airline industry.

Unbundling and ancillary fees are closely related to each other. Unbundling is the act of dividing a product or service into individual elements and selling them separately. For example, unbundling in the airline industry refers to dividing the service of air transportation from ancillary (i.e., additional) services, such as checked baggage, food & beverage, in-flight internet access, etc. By doing this, airlines can stay competitive in the market, keeping their airfares in check, while also being able to explore a new source of revenue. In this context, Table 1 shows a synoptic table for studies on the topic of ancillary fees and their acceptability in the airline industry.

Table 1 Ancillary fees and their acceptability in the airline industry

Authors	*Main findings*	*Methodology*
Garrow et al. (2012)	Ancillary fees are increasingly becoming more important to airlines' financial performance.	Data analysis
Tuzovic et al. (2014)	Passengers feel betrayed by airlines that introduced baggage fees.	Structural Equation Models
O'Connell & Warnock-Smith (2017)	Passengers accept baggage fees better than other ancillary fees.	Data analysis
Warnock-Smith et al. (2017)	Passengers have stronger opinions towards 'necessity' products, such as checked baggage.	Data analysis

Several studies in the literature have shown that passengers are dissatisfied with the ongoing unbundling trend in the airline industry. With this dissatisfaction in mind, we argue that the introduction of an ancillary fee, such as one for checked baggage, may

discontent passengers to the point that a portion of them become discouraged to use the air transport system, thus reducing the demand for this service. To further investigate this matter, we also review studies that analyzed the effects of the introduction of baggage fees in the airline industry.

One of the objectives of the introduction of baggage fees in the civil aviation industry was to allow airlines to become more competitive by reducing their ticket prices, achieved by unbundling the free checked baggage allowance from the airfare. In this regard, Table 2 shows a synoptic table for studies on the topic of baggage fees and their effects on the airline industry.

Table 2 Baggage fees and their effects on the airline industry

Authors	*Main findings*	*Methodology*
Henrickson & Scott (2012)	Baggage fees allow airlines to reduce airfares but still increase their revenue.	OLS; SAR
Scotti & Dresner (2015)	Baggage fees lead to a reduction in ticket prices and demand.	3SLS
Scotti et al. (2016)	Baggage fees are associated with a reduction in delayed flights and mishandled baggage rates.	OLS
Nicolae et al. (2017)	The introduction of baggage fees is associated with improved on-time performance.	Event study
Yazdi et al. (2017)	The introduction of baggage fees is associated with improved on-time performance.	3SLS
Kwoka & Wang (2020)	Airlines can use baggage fees to divert high-cost passengers to their rivals.	OLS

Table 2 briefly presented empirical studies analyzing the effects of the implementation of baggage fees in the airline industry – such as their effects on ticket price, flight demand, and airline operational performance. Although Scotti & Dresner (2015) and Yazdi et al. (2017) have partially investigated the effects of baggage fees on demand, they did not investigate this matter beyond that point. To expand upon those studies, our paper intends to investigate the effects of baggage fees on passengers depending on their purpose of travel (i.e., tourism or business). Furthermore, we also inspect another segment of passengers and investigate whether previous car or bus travelers stopped flying due to the implementation of baggage fees, which would indicate evidence of a substitution effect in the transport sector. This is the main scientific contribution of this research, as the literature on the road-air transport substitution effect is scarce.

3. METHODOLOGY AND DATA

The main objective of this paper is to investigate the effects of baggage fee implementation on passenger demand. To achieve this goal, we employ an econometric regression model to analyze data from domestic flights between city pairs in the Brazilian civil aviation market. We chose to use a regression model in this paper due to its extensive use in the air transport literature to make inferences and analyze correlations between several variables in the industry. Moreover, the use of a regression model in this paper also enables us to compare our results with previous studies that analyzed the effects of baggage fees in the airline industry.

Regarding the estimation strategy, this study uses a log-log specification to estimate the elasticity of the variables. To correct the possible endogeneity problems with the standard regression model, and to also account for individual characteristics that do not vary over time, our estimation models use the Fixed-Effects (FE) method. This research also tested the Random-Effects model and run a Hausman test to verify the appropriateness of using the FE model. The Hausman test rejected the null hypothesis, thus using the Fixed-Effect model is appropriate in this study.

Table 3 presents a summary of the variables we used in our model and our expectations regarding their effects on passenger demand. All of our variables are at the city pair level, and we choose our variables based on studies of Scotti & Dresner (2015) and Yazdi et al. (2017). As they have previously investigated the effects of baggage fees on demand, we found it appropriate to use similar variables for a better comparison with their results.

The dataset we used in the estimation consists of panel data of domestic directional city pairs in Brazil. The period considered in the analysis was from January 2016 to December 2018, totaling 24,965 observations. All data we used in this paper is publicly available on Brazilian national agencies' websites. Our main data source for the airline industry data was the National Civil Aviation Agency (ANAC), while we extracted the data related to GDP per capita from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Lastly, we extracted the passenger profile data – such as the ratio of passengers that have previously traveled a route by car or bus – from a survey taken by the Institute of Economic Research Foundation (FIPE).

Table 3 Description of the variables

Variables	*Description*	*Expectation*
Demand	Total revenue passengers	N.A.
Frequency	Total flights between city pairs	+
Price	Average airfare between city pairs	-
Distance	Distance between city pairs	-
Hub	Presence of a hub in the city pair	+
Slot	Presence of a slot-restricted airport in the city pair	+
HHI	Herfindahl-Hirschman Index at the city pair level	-
Income	Average GDP per capita between city pairs	+
Bag	Implementation of baggage fee	-
Tourism	Share of passengers flying for leisure purposes	-
Business	Share of passengers flying for business purposes	0
Car	Share of passengers who have previously traveled by car between city pairs	-
Bus	Share of passengers who have previously traveled by bus between city pairs	-

4. ESTIMATION RESULTS

First, we present the estimation results for the model used to investigate the general effect of baggage fee introduction on passenger demand in the Brazilian civil aviation industry. Table 4 presents the baseline models' results.

Our variable *Frequency* presents a positive effect on demand, which is the result we were expecting. Previous passenger demand studies in the literature have intensively examined the positive relationship between the number of flights on a route and the total number of revenue passengers, and our result further confirms this correlation. Furthermore, our result for the *Price* variable also confirms the results found in the literature, showing that passenger demand increases as ticket price decreases.

Table 4 Baseline models

lnDemand	***(1)***	***(2)***
lnFrequency	0.8591***	0.8588***
lnPrice	-0.0654***	-0.0662***
lnDistance	0.5436*	0.5413*
Hub	0.0408	0.0416
Slot	0.0123†	0.0087
lnHHI	-0.1618***	-0.1608***
lnIncome	0.3511*	0.3383*
Trend	0.0008**	0.0003
Bag	0.0162**	-0.2117†
Bag_Trend	-	0.0010†
R^2_adj	0.6422	0.6230
RMSE	0.2546	0.2546
N_obs	19,869	19,869

†<0.25, *<0.10, **<0.05, ***<0.01

Regarding the *Distance* variable, our estimations show an unexpectedly positive effect on demand. While studies such as Yazdi et al. (2017) show that passenger demand usually concentrates on short and medium-haul routes, upon further investigation, we understand that we cannot make the same inference for the Brazilian civil aviation market. Although a large number of flights demand are indeed concentrated in short and medium-haul routes in the Southeast region of Brazil, we also have to acknowledge that a significant number of flight demand originates from interregional flights as well. In other words, while a large portion of economic activities is concentrated in the Southeast region, there are still loci of economic activities in the South, Central-West, and Northeast regions. And because of the continental dimension of Brazil, the long-haul flights between these regions generate enough demand for flights, as shown by the positive effect of *Distance* on demand in our model. Thus, future studies that may use the findings of this research should consider the dimension and the average distance between the city pairs in Brazil and other countries.

Hub and *Slot* did not present statistically significant results, suggesting that they are not an important determinant for flight demand. This initial inference goes against results found in the literature, for example, Yazdi et al. (2017). Upon careful investigation we can attribute the result we found to (i) the small number of time in our dataset, which only covers the period from January 2016 to December 2018, and (ii) that hub and slot-restricted airports in Brazil were almost at full capacity in that period, thus no increase in demand was observed due to the infrastructure limitation.

HHI presented a negative effect on demand, which is the result we expected. This result shows that dominant airlines may abuse their market power to increase ticket prices or offer a low-quality service, which can induce passengers to seek an adjacent route or travel by other means.

Income shows a positive sign, thus the higher the GDP per capita between city pairs, the more passengers fly on that route, which is a result that agrees with other studies in the literature such as Scotti & Dresner (2015). Our *Trend* variable presents a positive sign for model (1), but a statistically not significant coefficient for model (2), thus the results suggest that there is not a clear effect of time on demand. Similar to *Hub* and *Slot*, this unexpected result may also be due to the small number of time in our dataset. Another reason that we may think of is that our analysis encompasses the period when Brazil was in recession in 2016, as well as its slow economic recovery in 2017-2018.

Finally, we analyze our bag variables. In model (1) there is a positive sign for *Bag*, which suggests that there was an unexpected increase in passenger demand after the implementation of baggage fees in the Brazilian civil aviation industry. But when we add our interacted variable *Bag_Trend* in a slightly more robust model, such as presented in column (2), the results show that the implementation of baggage fees (i.e., the variable *Bag*) has had a negative effect in the immediate period after its implementation, while it presented a long term positive effect on demand (i.e., *Bag_Trend*). Thus, our results suggest that the implementation of baggage fees does have a negative effect during its initial period of implementation, which we could attribute to the lack of acceptability of such fees as investigated by Tuzovic et al. (2014). But as time passes, passengers may seem to better accept baggage fees in the airline industry, as suggested by O'Connell & Warnock-Smith (2017) and Warnock-Smith et al. (2017). Although our inferences on baggage fees and their effects on demand may make sense if we compare them to previous studies in the literature, it is also important to note that, at least for our baseline models, both *Bag* and *Bag_Trend* presented a high p-value (<0.25). Thus, we need to further investigate these variables to make any assertive inference. Next, we challenge our baseline models and investigate different aspects of demand that may be affected by baggage fees.

Our second model builds upon our baseline model. Specifically, we now investigate the relationship between baggage fees and demand depending on the travel purpose of the passenger. Our goal with this model is to investigate if and how baggage fees affect passengers that are traveling for leisure or business purposes. Table 5 presents the results that investigate the relationship between baggage fees and the purpose of travel.

Table 5 Travel purpose models

lnDemand	***(3)***	***(4)***	***(5)***
lnFrequency	0.8588***	0.8588***	0.8588***
lnPrice	-0.0668***	-0.0666***	-0.0668***
lnDistance	0.5484*	0.5456*	0.5502*
Hub	0.0420	0.0420	0.0420
Slot	0.0088	0.0088	0.0088
lnHHI	-0.1608***	-0.1608***	-0.1608***
lnIncome	0.3507*	0.3481*	0.3494*
Trend	0.0003	0.0003	0.0003
Bag	-0.2061†	-0.2169†	-0.1877
Bag_Trend	0.0010†	0.0010†	0.0010†
Bag_Tourism	-0.0134	-	-0.0330
Bag_Business	-	0.0104	-0.0205
R^2_adj	0.6230	0.6230	0.6230
RMSE	0.2546	0.2546	0.2546
N_obs	19,869	19,869	19,869

†<0.25, *<0.10, **<0.05, ***<0.01

Our base variables (*Frequency*, *Price*, *Distance*, etc.) presented similar results as shown in Table 4, thus we do not repeat our inferences about those variables. Instead, we

focus on analyzing the variable *Bag* and its interactions. *Bag* itself presented a similar result as the previous results for our specifications (3) and (4), but it lost its statistical significance at <0.25 for specification (5). This result suggests that the implementation of baggage fees does not seem to have an immediate effect on demand. *Bag_Trend* showed a positive sign again, thus suggesting that, over time, passengers seem to accept baggage fees in the airline industry.

Regarding the interacted variable *Bag_Tourism*, we expected it to present a negative sign, which would mean that leisure passengers are driven away by baggage fees as they usually carry more baggage than business travelers and they are more price-sensitive. Despite our expectations, our models (3) and (5) suggest otherwise that leisure passengers are not affected at all by the implementation of baggage fees. These results suggest that, while leisure passengers may find baggage fees inconvenient, it is not enough of a reason to quit flying. As for *Bag_Business*, another interacted variable, we expected it not to be a significant factor on demand, as confirmed in our models (4) and (5).

The results from Table 5 suggest that, while baggage fees may affect a portion of passengers in the airline industry, as pointed out by the variable *Bag*, we can attribute this effect to neither leisure nor business passengers exclusively. Thus, to investigate which type of passenger baggage fees affect, we investigate next another segment of passengers: the ones that have previously used an alternative transport mode, such as bus or car, to travel between city pairs.

Our next, and last model, investigate our last segmentation of passengers, which are the ones that used an alternative transport mode to travel between city pairs in the past. Our goal here is to investigate whether the introduction of baggage fees in the airline industry may have forced passengers to use buses or cars to travel instead of taking an airplane. Table 6 presents the results for models that investigate whether the introduction of baggage fees caused transport mode substitution in the airline industry.

As shown in Table 6, our base variables presented similar results to our previous specifications. *Bag* in these models has recovered their statistical significance, albeit at <0.25, showing that the implementation of baggage fees has had a negative effect on overall passenger demand. *Bag_Trend* also follows our previous results, presenting a positive sign and statistical significance at <0.25.

Table 6 Substitution effect models

lnDemand	***(6)***	***(7)***	***(8)***
lnFrequency	0.8586***	0.8590***	0.8589***
lnPrice	-0.0635***	-0.0666***	-0.0638***
lnDistance	0.5338*	0.5123†	0.4944†
Hub	0.0397	0.0410	0.0387
Slot	0.0074	0.0088	0.0073
lnHHI	-0.1596***	-0.1608***	-0.1594***
lnIncome	0.3360*	0.3246*	0.3175*
Trend	0.0003	0.0003	0.0003
Bag	-0.2096†	-0.2158†	-0.2150†
Bag_Trend	0.0011†	0.0010†	0.0011†
Bag_Car	-0.1058***	-	-0.1123***
Bag_Bus	-	0.0980†	0.1318**
R^2_adj	0.6234	0.6231	0.6235
RMSE	0.2545	0.2546	0.2545
N_obs	19,869	19,869	19,869

†<0.25, *<0.10, **<0.05, ***<0.01

As for our substitution effect analysis, the interacted variables *Bag_Car* and *Bag_Bus* presented interesting results. *Bag_Car* had a negative result for our models (6) and (8), with statistical significance at <0.01, showing that there was a decrease in demand in those routes where a significant part of passengers have already traveled by car. This result suggests a substitution effect caused by the introduction of baggage fees in the Brazilian airline industry, as passengers have given up on using air transport in favor of car travel in the period immediately after the implementation of baggage fees.

On the other hand, the variable *Bag_Bus* shows the opposite result. With a positive sign and a statistical significance of <0.25 for specification (7) and <0.05 for specification (8), this result shows that the implementation of baggage fees is not enough to cause a substitution effect from air travel to bus travel. Not only that, but the positive sign also indicates that the demand for air travel increased on such routes. Thus, our results suggest that the implementation of baggage

fees has caused a substitution effect, but in this case, bus travelers became air transport passengers. One argument that we can think of is that, in general, bus travelers are more price-sensitive than car travelers, thus they are positively affected by policies to reduce airfares such as baggage fees. Another explanation is that bus passengers are more price-sensitive to ticket prices alone, whereas car passengers are more price-sensitive to total prices (ticket price + checked baggage fee), given that the latter can choose to accommodate their baggage in the car depending on the distance between the city-pairs.

These results indicate that the introduction of baggage fees affects the segment of passengers that have previously traveled between city pairs using other transport modes, such as cars or buses. Furthermore, our results suggest that baggage fees do indeed cause a substitution effect in the transport sector. Passengers that have previously traveled on that route by car in the past seem to stop flying and travel behind wheels. Moreover, the implementation of baggage fees also affects previous bus travelers, but not the way we expected. Our results suggest that, surprisingly, bus travelers are more inclined to fly after the implementation of baggage fees in the airline industry. We believe that this reverse substitution effect is due to bus travelers being more price-sensitive than car travelers, and thus can better enjoy the benefits of a policy such as baggage fees in the airline industry.

5. CONCLUSIONS

In a competitive industry such as civil aviation, airlines have to increasingly seek greater efficiency to survive in the market. In recent years, the unbundling strategy has become increasingly popular for airlines to achieve greater efficiency. Unbundling, or debundling, in the context of civil aviation is the act of dividing the fundamental transportation service from ancillary services, such as checked baggage. This strategy has proven successful in the industry as it allows airlines to keep airfares in check to attract price-sensitive passengers who would not make use of ancillary services. Moreover, with the unbundling strategy airlines have a new source of income from the sale of services such as checked baggage, pre-assigned seats, in-flight entertainment, internet access, and food & beverage. While airlines are extremely satisfied with the unbundling trend in the industry, several studies show that passengers are unhappy with the growing adoption of this strategy by airlines.

In this context, this paper investigated the effects of the baggage fee policy implementation on passenger demand by analyzing the case of the Brazilian airline industry, which implemented such a policy in 2017. We developed an econometric model to analyze data from 2016-2018 to examine if and how the baggage fee policy has affected the demand for domestic flights in Brazil. Our results indicate that this policy has caused a short-term decrease in overall passenger demand. On the other hand, when we analyze the long-term effects of that policy, the results suggest an increase in the number of passengers over time. We believe that these results are a reflection that, in the initial period, passengers do not accept baggage fees, as observed from previous studies in the literature. But over time, price-sensitive passengers begin to see the benefits of this policy in reducing the base ticket price, which would boost the demand for flights.

Our general contribution to the literature with this paper was to further study the effects of baggage fees on passenger demand. Specifically, one of our contributions was to analyze if either leisure or business passengers are affected by baggage fees, which would help us to better explain how this policy affects a certain segment of passengers. Despite our initial expectations, the estimation results show that the baggage fee policy has not explicitly affected either leisure or business passengers.

Another contribution of our paper is to investigate the baggage fee effects on an alternative segmentation of passengers and analyze those who have previously traveled by car or bus between city pairs. By doing so, we can look for pieces of evidence that baggage fees can cause a substitution effect in

the transport sector, with passengers deciding to stop flying and take the road to their destination. Our results show a clear decrease in passenger demand on those routes with a higher share of passengers who have previously traveled by car. We believe this result to be evidence of a substitution effect in the transport sector, with passengers opting to drive to their destinations instead of taking a flight after the baggage fee implementation. On the other hand, our results also suggest a reverse substitution effect for previous bus travelers. According to our estimations, the demand for flights increases on those routes with a higher share of passengers who have previously traveled by bus. We believe that this segment of travelers is more price-sensitive than car travelers, thus they benefit more from baggage fees.

The general results found in this paper show that baggage fee policies may negatively affect passenger demand in short term, which indicates an initial rejection of such policies by passengers. Still, when we expand our analysis period we see that baggage fees have a positive effect over time, which indicates a later acceptance of this policy. The managerial implication of our results for airlines in markets that will soon introduce baggage fees is that they should be prepared for a short-term reduction in their number of passengers. Although studies and business reports indicate greater financial efficiency for airlines after the implementation of baggage fees, they should consider a momentary reduction in the number of passengers until the latter eventually start accepting baggage fees.

One of the limitations of this paper is that it only considers the case of domestic flights in Brazil, thus results for a similar study in another context may differ according to that region's civil aviation industry. Another limitation of this study is that we use cross-sectional survey data to act as a proxy for passenger segments (tourism, business, car, and bus), thus we can only infer, and not directly observe the substitution effect in the transport sector.

To build on this paper's limitation, we suggest that future studies should analyze the effects of baggage fees in another context, such as analyzing a different market than Brazil. Another suggestion is to cross-analyze data from road transportation agencies and to check whether there was a noticeable increase in car or bus travel in the period immediate to the implementation of baggage fees in the airline industry. This way it is possible to directly observe, and not only infer, the effects of baggage fees in the transport sector regarding the substitution effect.

References

Albalate, D., & Fageda, X. (2016). High speed rail and tourism: Empirical evidence from Spain. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 85, 174-185.

Barros Jr, F., Castilho, R., & Galveas, D. (2021). On the Regulation of Checked Baggage in the Airline Industry. *International Economic Journal*, 1-23.

Bergantino, A. S., & Madio, L. (2020). Intermodal competition and substitution. HSR versus air transport: Understanding the socio-economic determinants of modal choice. *Research in Transportation Economics*, 79, 100823.

Borhan, M. N., Ibrahim, A. N. H., Miskeen, M. A. A., Rahmat, R. A. O., & Alhodairi, A. M. (2017). Predicting car drivers' intention to use low cost airlines for intercity travel in Libya. *Journal of Air Transport Management*, 65, 88-98.

BTS (2022). *Bureau of Transportation Statistics. Average Domestic Airline Itinerary Fares*. Retrieved August 8, 2022, from https://www.transtats.bts.gov/averagefare/

Castillo-Manzano, J. I., Pozo-Barajas, R., & Trapero, J. R. (2015). Measuring the substitution effects between high speed rail and air transport in Spain. *Journal of Transport Geography*, 43, 59-65.

D'Alfonso, T., Jiang, C., & Bracaglia, V. (2015). Would competition between air transport and high-speed rail benefit environment and social welfare?. *Transportation Research Part B: Methodological*, 74, 118-137.

Garrow, L. A., Hotle, S., & Mumbower, S. (2012). Assessment of product debundling trends in the US airline industry: Customer service and public policy implications. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(2), 255-268.

Givoni, M., & Dobruszkes, F. (2013). A review of ex-post evidence for mode substitution and induced demand following the introduction of high-speed rail. *Transport reviews*, 33(6), 720-742.

Henrickson, K. E., & Scott, J. (2012). *Baggage fees and changes in airline ticket prices*. In Pricing behavior and non-price characteristics in the airline industry. Emerald Group Publishing Limited.

Kwoka, J., & Wang, P. (2021). Raising Rivals Costs by Customer Diversion: Evidence from Airline Baggage Fees. *International Journal of the Economics of Business*, 28(1), 1-18.

Nicolae, M., Arıkan, M., Deshpande, V., & Ferguson, M. (2017). Do bags fly free? An empirical analysis of the operational implications of airline baggage fees. *Management Science*, 63(10), 3187-3206.

O'Connell, J. F., & Warnock-Smith, D. (2013). An investigation into traveler preferences and acceptance levels of airline ancillary revenues. *Journal of Air Transport Management*, 33, 12-21.

Scotti, D., & Dresner, M. (2015). The impact of baggage fees on passenger demand on US air routes. *Transport Policy*, 43, 4-10.

Scotti, D., Dresner, M., & Martini, G. (2016). Baggage fees, operational performance and customer satisfaction in the US air transport industry. *Journal of Air Transport Management*, 55, 139-146.

Tuzovic, S., Simpson, M. C., Kuppelwieser, V. G., & Finsterwalder, J. (2014). From 'free'to fee: Acceptability of airline ancillary fees and the effects on customer behavior. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 21(2), 98-107.

Warnock-Smith, D., O'Connell, J. F., & Maleki, M. (2017). An analysis of ongoing trends in airline ancillary revenues. *Journal of Air Transport Management*, 64, 42-54.

Yazdi, A. A., Dutta, P., & Steven, A. B. (2017). Airline baggage fees and flight delays: A floor wax and dessert topping?. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 83-96.

Zhang, F., Graham, D. J., & Wong, M. S. C. (2018). Quantifying the substitutability and complementarity between high-speed rail and air transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 191-215.

SEGURANÇA E PRODUÇÃO NO *GROUND HANDLING* EM AEROPORTOS: UMA ABORDAGEM POR MEIO DO *DESIGN THINKING*

Rodrigo Flório Moser
Universidade de São Paulo (USP), Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: mailto:rfmoser@usp.br

PAPER ID: SIT197

ABSTRACT

A segurança nas operações em pátio tem sido historicamente tratada como responsabilidade primária dos operadores aéreos e de aeródromo, sujeitos diretamente à regulação estatal, e subsidiária às empresas terceirizadas, tipicamente as empresas de serviços auxiliares ao transporte aéreo. Altos índices de ocorrências nos pátios têm provocado uma mudança desse paradigma: organizações internacionais e autoridades de aviação civil, demandadas pela indústria, estão inclinadas a impor regulação e fiscalização direta a esses provedores. No entanto, a crença de que mais regras, prescrições e supervisão direta do Estado levariam a melhores resultados é questionável, embora certamente onerosa. Este artigo apresenta os conceitos subjacentes a uma pesquisa em andamento, com uma abordagem alternativa para o problema de pesquisa do dilema de segurança e produção no *ground handling*, por meio do raciocínio abdutivo e criação de *frames* do *design thinking*. A partir de uma revisão sistemática da literatura, questionando como entregar simultaneamente operações em solo seguras e eficientes como valores, foi criado um *frame* organizacional, parafraseando as operações em pátio nos aeroportos com o "chão de fábrica" na indústria manufatureira. O princípio de funcionamento desta formulação seguiu exemplos bem-sucedidos naquela indústria, baseados nos fundamentos do design sociotécnico e de grupos semiautônomos, conforme encontrado na literatura revisada. O *frame* proposto se mostrou conceitualmente promissor para abordar os principais fatores contribuintes de acidentes e incidentes em pátios, segundo a literatura: (a) comunicação deficiente entre equipes e turnos; (b) pressão pela pontualidade das operações; (c) falta de supervisão e ausência ou não cumprimento dos procedimentos. A proposta de valor do *frame* é teoricamente capaz de entregar: (i) melhor comunicação entre os trabalhadores, reforçando a segurança; (ii) maior agilidade na resolução de problemas, aliviando a pressão dos tempos de *turnaround*; e (iii) contrabalançar a supervisão da equipe e o cumprimento dos procedimentos operacionais, respaldando um compromisso cognitivo entre segurança e produção. A fase seguinte da pesquisa prevê a implementação dessa proposta de organização do trabalho em uma empresa de serviços auxiliares ao transporte aéreo, seguida de validação quantitativa, por meio de indicadores de segurança e desempenho da produção.

Palavras-chave: aeroporto, *ground handling*, segurança, *design thinking*, *design* sociotécnico

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A pandemia de Covid-19 é o maior desafio que a indústria da aviação já enfrentou. Ainda assim, o ano de 2022 atesta a resiliência da indústria de transporte aéreo, que vem se recuperando em ritmo acelerado (IATA, 2022a).

As dificuldades da crise trouxeram também novas perspectivas para o aumento de eficiência e segurança das operações, reforçando o papel da tecnologia e dos fatores humanos para entrega de resultados.

Os aeroportos, como terminais de transporte, são os locais que mais concentram os trabalhadores, onde se destacam os serviços auxiliares ao transporte aéreo, que no Brasil representam 29% dos empregos gerados no setor (IBA, 2018). Particularmente, é no pátio de aeronaves dos aeroportos onde ocorre grande parte dessas decisões de *trade-off* produção e segurança.

Do ponto de vista regulatório, no âmbito internacional, há um entendimento de que a garantia da segurança nas atividades realizadas nos pátios de aeronaves é de responsabilidade primária dos operadores de aeródromo e operadores aéreos, aplicando-se diretamente os regulamentos aos quais estão sujeitos, de acordo com suas atividades, e subsidiariamente aos respectivos entes contratados para executar as atividades de forma terceirizada ou especializada.

Estima-se que em 2015 cerca de 70% das operações da aviação comercial e 20% das operações da aviação geral no país foram atendidas por ao menos uma empresa terceirizada para prover serviços auxiliares ao transporte aéreo (ABESATA, 2016). Desde 2021, com a consolidação do processo de terceirização das operações em solo da LATAM, quase a totalidade dessas operações servindo a aviação comercial de passageiros no Brasil é realizada por empresas terceirizadas, que não estão sujeitas diretamente à regulação e supervisão de segurança da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

Segundo a *Flight Safety Foundation* (FSF, 2019), estima-se que 27.000 acidentes e incidentes no pátio de aeronaves ocorrem anualmente em todo o mundo, uma taxa de 1 a cada 1.000 decolagens. Cerca de 243.000 pessoas são feridas anualmente nesses acidentes e incidentes, o que representa 9 a cada 1.000 decolagens. Essas ocorrências custam às empresas aéreas ao menos US$ 10 bilhões por ano, considerando custos diretos e indiretos.

Preocupados com esses índices, diversos setores da indústria, juntamente com órgãos reguladores tem avaliado implementar abordagens regulatórias mais diretas. A Organização da Aviação Civil Internacional vem adotando uma postura de orientação, recentemente reforçada pela publicação de um manual (ICAO, 2019), mas algumas autoridades, dentre as quais a Agência Europeia de Segurança da Aviação (EASA), já entraram no campo da provisão de regras e supervisão direta aos provedores de serviços auxiliares ao transporte aéreo (European Parliament, 2018).

Alternativamente, a presente pesquisa busca uma forma de abordar simultaneamente a garantia da proteção (segurança operacional) e melhoria do desempenho da produção nas operações nos pátios de aeronaves dos aeroportos, sem impor novos requisitos regulatórios e supervisão das autoridades de aviação civil sobre os provedores de serviços auxiliares ao transporte aéreo.

2. METODOLOGIA

O método de revisão sistemática da literatura foi utilizado para encontrar uma abordagem adequada para o problema de pesquisa: desenvolver uma visão integrada de produção e segurança no pátio de aeronaves.

A estratégia de pesquisa foi identificar trabalhos relevantes sobre operações de pátio nos últimos vinte anos, utilizando como base de pesquisa a *Web of Science*, com os temas "*risk*" ou "*safety*" ou "*turnaround*" e "*ground handling*" ou "*ground operations*" ou "*airport surface*", excluindo temas relacionados ao risco da fauna. Foram consideradas publicações na forma de "*article*" ou "*review*".

Ao mesmo tempo, realizou-se uma revisão *ad-hoc* da literatura sobre *design thinking*, organização do trabalho voltado para a autonomia, partindo da escola sociotécnica e grupos semiautônomos, análise ergonômica do trabalho e ciência da segurança (*safety science*).

A partir da revisão da literatura, foram formuladas hipóteses de aplicação da experiência da indústria manufatureira como um *frame*

adequado para entregar o valor desejado nas operações em estudo, partindo dos princípios do design sociotécnico e de grupos semiautônomos para formular essa integração entre segurança e eficiência. São hipóteses de que essa forma de organização do trabalho proporcionaria às equipes de solo em aeroportos:

H1: Maior facilidade de comunicação entre trabalhadores, melhorando a qualidade do processo (segurança).

H2: Maior velocidade para resolver problemas e aliviar a pressão de cumprimento dos horários das operações, melhorando o desempenho da produção.

H3: Suprir em certa medida a supervisão do trabalho e cumprimento dos procedimentos operacionais, viabilizando uma solução de compromisso de ajuste entre desempenho e segurança.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura científica mostrou ainda que, nos últimos vinte anos, a quantidade de publicações dedicadas especificamente ao tema da segurança operacional nos serviços de pátio é bastante reduzida e com abordagens variadas. Apesar das diferenças, muitas das conclusões desses estudos sobre os fatores contribuintes de acidentes e incidentes são coincidentes, onde se destacam: i) a pressão do tempo para garantia da partida da aeronave no horário; ii) comunicação deficiente entre pessoal de solo, entre tripulantes e pessoal de solo ou entre turnos; iii) problemas relacionados a equipamentos, especialmente a ausência de equipamento apropriado ou manutenção deficiente; iii) problemas relacionados a falta de supervisão ou descumprimento ou ausência de procedimentos operacionais; iv) quantidade de pessoal insuficiente; v) problemas relacionados à complexidade da operação, como o congestionamento ou as reduzidas distâncias de separação (Esteves, 2017).

Interesse particular deste artigo é o impacto na segurança decorrente de questões relacionadas à pressão sobre os trabalhadores para cumprimento dos horários das operações, comunicação entre trabalhadores, supervisão do trabalho e cumprimento dos procedimentos operacionais. Os estudos mais relevantes foram sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 Aspectos de interesse apontados como principais fatores contribuintes

Fatores	*Literatura*
	Balk e Bossenbroek (2010)
	Chamberlin et al. (1995)
	IATA (2022b)
	Landry e Ingolia (2011)
	Lu et al. (2006)
	Wenner e Drury (2000)

Legenda:

 Pressão para cumprimento dos horários

 Comunicação entre trabalhadores

 Supervisão do trabalho e procedimentos

Os aspectos conceituais obtidos na literatura para formulação do *frame* organizacional proposto são apresentados a seguir.

3.1. Design e pensamento abdutivo

O *design thinking* foi utilizado como chave para desbloquear o modelo mental tradicionalmente aplicado ao setor de aviação, em que produção e proteção constituem pratos de uma mesma balança e competem continuamente pelos recursos da organização, originando o "dilema gerencial" da alocação ótima de recursos, de modo a viabilizar o negócio.

O Design é uma disciplina integradora: designers estão explorando integrações concretas de conhecimentos que combinam teoria com a prática tendo em vista novos fins produtivos, e esta é a razão pela qual os pesquisadores se voltam para o *design thinking* enquanto compreensão (*insight*) sobre as novas artes liberais da cultura tecnológica (Buchanan, 1992).

Aspecto chave do *design thinking* é o raciocínio abdutivo. Douven (2017) argumenta que o raciocínio abdutivo não se limita aos con-

textos cotidianos. Muito pelo contrário: os filósofos da ciência argumentam que a abdução é uma pedra angular da metodologia científica. Mais ainda, a metodologia abdutiva é o melhor que a ciência pode prover (Williamson e Armour-Garb, 2017).

Para chegar ao âmago do pensamento do *design*, introduzindo o raciocínio abdutivo, Dorst (2011) descreve, por meio da lógica formal, os padrões básicos de raciocínio que o ser humano usa na resolução de problemas, comparando diferentes configurações de incógnitas na equação, conforme ilustrado na Figura 1.

Para Dorst (2011), a abdução vem em dois formatos, tendo em comum que o resultado do processo é concebido em termos de valor. Na primeira forma, não se sabe ainda que "coisa" combinada com o princípio de funcionamento poderia entregar o valor almejado. A forma mais complexa de abdução, *Abduction-2*, ocorre quando no início do processo de resolução de problemas sabe-se apenas o valor final que se quer alcançar. Torna-se, portanto, necessário criar simultaneamente uma "coisa" e um "princípio de funcionamento" que combinados entreguem o valor almejado.

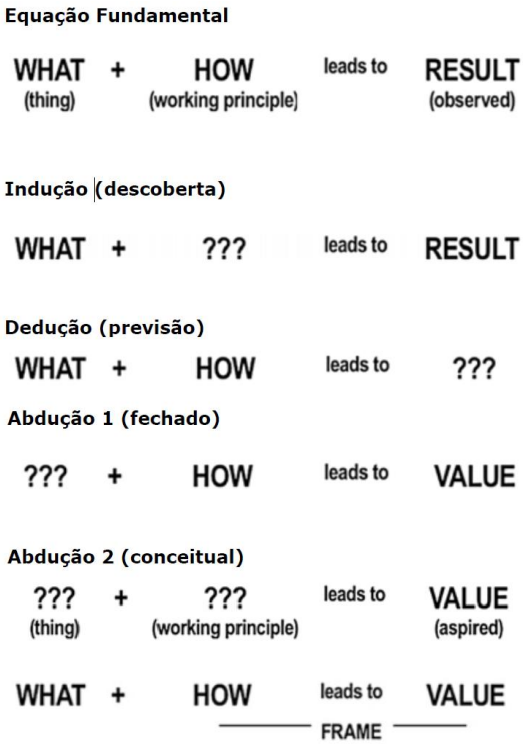


Figura 1 Equação do pensamento lógico dedutivo, indutivo e abdutivo (adaptado de Dorst, 2011)

Nesse caso, uma abordagem promissora é a utilização de *frames*, parafraseados por metáforas, incluindo conjuntos complexos de pressupostos e complementados por temas – ferramentas para dar sentido à análise, capazes de articular uma resposta para o paradoxo central da situação problema. Entenda-se aqui a palavra "paradoxo" como uma declaração complexa que pretenda comportar dois ou mais aspectos verdadeiros ou válidos em si mesmos, mas que não podem ser combinados (Dorst, 2011).

No caso concreto, pretende-se entregar o valor de operações seguras e eficientes no pátio de aeronaves. No contexto em estudo, esses dois adjetivos são normalmente contrapostos e disputam os recursos da organização, como se verá adiante, daí a importância do pensamento abdutivo e *framing* na solução dessa declaração complexa de valor.

A tese chave seria: se olharmos para o problema das operações de pátio em aeroportos do ponto de vista da indústria manufatureira e adotarmos como princípio de funcionamento os exemplos bem-sucedidos de design sociotécnico e de grupos semiautônomos associados a esse setor, seria possível então criar o valor pelo qual estamos nos esforçando (proteção + produção)?

3.2. Sistema sociotécnico e autonomia

Um dos princípios que se destaca na organização sociotécnica do trabalho é o princípio da compatibilidade, onde o processo de *design* deve ser compatível com seus objetivos, ou seja, se o objetivo do design é um sistema capaz de se auto modificar, de se adaptar à mudança e de fazer o máximo uso das capacidades criativas do indivíduo, então uma organização construtivamente participativa é necessária (Cherns, 1987).

Quanto aos grupos semiautônomos, uma importante dimensão é sua capacidade de decidir entre diferentes prioridades em situações inesperadas do dia a dia, chamadas de "eventos". Grupos semiautônomos atuando no "chão-de-fábrica" poderiam decidir essas prioridades melhor e mais rápido que seus supervisores e gerentes (Marx e Simonetti, 2013).

A questão central para abordar simultaneamente a produção e a proteção (segurança) nas operações de pátio em aeroportos é entender como o trabalho é organizado. Deve-se,

portanto, estabelecer o grau, alcance e limites das prescrições, visando alcançar os objetivos tanto da segurança quanto da eficiência produtiva, com adequadas condições de trabalho e preservação da saúde dos trabalhadores e pessoas em torno do ambiente produtivo (Salerno, 1998).

Dekker (2017) aponta que não há evidências concretas de que mais regras e supervisão significam avanço na segurança. Pelo contrário, há um crescente interesse em formas alternativas de organizar o trabalho, muitas vezes baseadas na autonomia dos trabalhadores em grupos de trabalho. Marx e Simonetti (2013) apontam que esse movimento deve ser considerado como uma iniciativa adotada pelas empresas para sobreviver em um novo cenário, caracterizado por rápidas mudanças nos ambientes de negócios e pelo aumento da competição por custos, qualidade, inovação e flexibilidade. Há fortes sinais de que esse é o cenário no setor de serviços auxiliares ao transporte aéreo.

Uma das principais fontes de inspiração e conceituação para esses novos modelos de organização do trabalho, especialmente no aspecto humanista, são os princípios sociotécnicos, que remontam à fundação da *London Tavistock Institute* em 1946. O objetivo do design sociotécnico sempre foi "a otimização conjunta dos sistemas social e técnico" (Mumford, 2006).

Um sistema sociotécnico é a combinação sinérgica de seres humanos, máquinas, ambientes, atividades de trabalho e estruturas e processos organizacionais que compõem um determinado empreendimento, abrangendo principalmente sistemas complexos nos quais seres humanos colaboram em direção a um objetivo comum (Carayon et al., 2015). Nesse sentido, as interações no sistema sociotécnico, com comunicação e tomada de decisão democrática e participativa, e entre o sistema e o ambiente externo em que está situado, é fundamental para a aplicação desses princípios.

3.3. Análise ergonômica do trabalho

A literatura sobre análise ergonômica do trabalho permitiu uma visão mais concreta desse dilema, conceituando trabalho prescrito e trabalho real, onde cada indivíduo assume compromissos e arbitragens entre o benefício da segurança regulamentada, imposta pelas normas e regras, e a perda que dela resulta para a segurança em ação, baseada na competência dos operadores.

A discrepância entre o trabalho prescrito e o trabalho real é amplamente estudada pela análise ergonômica do trabalho onde se destaca o trabalho de Leplat (1989) apud Carayon et al. (2015). O conflito entre esses dois pontos de vista, o que propõe maximizar a prescrição e o controle externo sobre o trabalho (que predomina na literatura sobre segurança no pátio de aeronaves) e o que defende a autonomia e maior discrição para a ação, está sempre presente.

Nesse sentido, Abrahão et al. (2009) didaticamente apresentam os diferentes elementos envolvidos na situação de trabalho e como se articulam, conforme Figura 2.

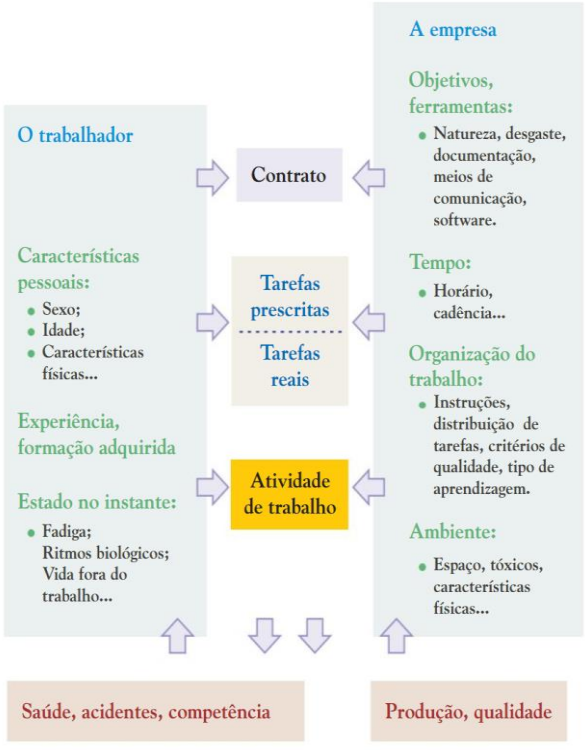


Figura 2 Atividade de trabalho: tarefas prescritas e tarefas reais (Abrahão et al., 2009. Adaptado de Guérin et al., 2001)

As implicações para a segurança dessa dicotomia na atividade de trabalho, entre tarefa prescrita e tarefa real, são concretas. Carayon et al. (2015) entende que os trabalhadores geralmente agem com algum nível de entusiasmo e estão comprometidos com seu trabalho, e isso

explica por que as metas de desempenho são frequentemente atingidas. Eles podem se desviar do que foi prescrito (Leplat, 1989 apud Carayon et al., 2015), e isso reflete a capacidade dos trabalhadores de formular estratégias e lidar com os desafios de desempenho (Dejours, 2009 apud Carayon et al., 2015). Conclui que para evitar acidentes e lesões, é importante projetar e gerenciar sistemas de trabalho que evitem a dependência de um regime rigoroso de prescrição.

Nesse tipo de ambiente, onde se permite que os trabalhadores discutam entre si os objetivos, compondo produção e proteção, é um tipo de "espaço de deliberação" (Dejours, 2009 apud Carayon et al., 2015) onde os conflitos são claramente definidos e diferentes grupos podem alcançar um compromisso e equilibrar as necessidades da pontualidade dos voos com a segurança das operações.

3.4. Ciência da segurança

A visão tradicional de segurança é regida pelo princípio de eliminação de falhas técnicas e erros humanos. As recomendações provenientes da investigação de eventos passados dão origem a materiais, equipamentos e procedimentos mais confiáveis, operacionalizados por um sistema de supervisão da conformidade com os procedimentos prescritos, reduzindo assim a variabilidade do trabalho realizado. No entanto, essa visão se mostrou limitada para superar as fronteiras de desempenho de segurança de sistemas sociotécnicos complexos. Uma abordagem alternativa que vem sendo pesquisada, denominada Safety-II, propõe focar nas operações normais, com um modelo mental onde a segurança seria a capacidade de sucesso tanto em condições esperadas quanto inesperadas (Hollnagel, 2014).

Uma consequência dessa perspectiva é que a segurança pode deixar de competir por recursos com o negócio principal, pois o que beneficia um também beneficiará o outro. Outro efeito é que a aprendizagem pode se concentrar no que deu certo, o que significa que existem inúmeras oportunidades para aprender, e que os dados estão prontamente disponíveis, uma vez que as falhas não são mais o foco da atenção (Hollnagel, 2013).

Esse potencial conflito entre segurança e outros objetivos da organização, especialmente em circunstâncias orientadas para o lucro, é frequentemente tratado como o "dilema-gerencial", ilustrado por Reason (2016) tanto para os gerentes quanto para o pessoal de linha de frente. Frequentemente, o que é adotado como prioridade de segurança no nível gerencial não reflete como as decisões de *trade-off* entre produtividade (velocidade da operação) e segurança (cumprimento do procedimento prescrito) são realmente formadas no curso normal das operações. Na prática, os trabalhadores são altamente sensíveis às prioridades reais de produção (Carayon et al., 2015).

Uma importante contribuição para a compreensão sobre operações seguras, na concepção de Hollnagel (2014) é trazida por Carayon et al. (2015). Os métodos científicos e de engenharia tradicionais normalmente dividem os sistemas em componentes distintos, que por sua vez são examinados separadamente, em busca da compreensão do comportamento total do sistema.

Esse raciocínio tende a falhar quando se trata de sistemas sociotécnicos complexos, onde as interações entre componentes e eventos podem ser indiretas e se manifestam de várias formas, remetendo ao conceito de propriedades emergentes. Essas propriedades surgem somente quando os componentes interagem e não são manifestadas no comportamento de componentes individuais. Este é o ponto principal, pois na visão dos autores a segurança é uma dessas propriedades emergentes.

4. MODELAGEM DA SOLUÇÃO

Apresenta-se a seguir a formulação do modelo (frame conceitual) capaz de entregar simultaneamente segurança e produtividade no *ground handling*.

H1. Comunicação e fluxo de informações

Voltando à questão apontada pela literatura como um dos principais fatores contribuintes para ocorrências no pátio de aeronaves, a comunicação entre trabalhadores é tratada amplamente por Cherns (1987), que aponta alguns princípios para um projeto organizacional e de

equipes de trabalho compatíveis com o modelo sociotécnico de grupos semiautônomos, sintetizados por Marx e Simonetti (2013):

- Posicionamento de fronteiras: os limites de atuação de uma equipe devem ser definidos de forma a possibilitar seu domínio de uma etapa completa dentro do processo de produção. Dessa forma poderá ser mais efetiva em suas ações, bem como será mais fácil aferir os resultados de sua atividade.
- Fluxo de informações: as informações relevantes para o processo decisório das equipes devem estar disponíveis, não dependendo de gerentes ou supervisores para fornecê-las. As equipes também devem receber avaliações e críticas no que se refere a suas atitudes e seu desempenho; e
- Suporte compatível: os departamentos que têm relacionamento relevante com as equipes operacionais deveriam operar de modo coerente com o projeto organizacional. A troca de informações deve ocorrer em tempo real.

Espera-se, portanto, que a organização do trabalho seguindo os princípios sociotécnicos seja uma abordagem apropriada para fazer frente à comunicação deficiente entre pessoal de solo, entre tripulantes e pessoal de solo ou entre turnos.

H2. Velocidade para resolver problemas

A oportunidade de aprendizagem e aumento do conhecimento dos indivíduos valoriza o ser humano no trabalho e proporciona o crescimento profissional. Assim, a organização do trabalho deve oferecer uma variedade de tarefas ao indivíduo e ao grupo. O princípio de multifuncionalidade do design sociotécnico (Cherns, 1987) advoga que o trabalho precisa de uma redundância de funções para adaptabilidade e aprendizado. Para que os grupos sejam flexíveis e capazes de responder às mudanças, eles precisam de uma variedade de habilidades.

O projeto organizacional baseado em equipes com autonomia estimula os indivíduos a expandirem suas habilidades. As pessoas tendem a ampliar seu espaço de decisão, seu senso de propriedade, sua capacidade de coordenação e a habilidade de resolver problemas mais complexos que as situações cotidianas, passando a depender menos dos gestores (Marx e Simonetti, 2013).

Sem dúvida, profissionais com melhor capacidade de decisão e velocidade para resolver os problemas do dia a dia da operação aliviariam a pressão do tempo para garantia da partida da aeronave no horário, considerada pela literatura como um dos principais fatores contribuintes para os acidentes e incidentes no pátio.

H3. Ajuste entre desempenho e segurança

Amalberti (2016) sustenta o conceito de compromisso e suficiência, em que a arte da intervenção de segurança bem sucedida consiste em regular os arranjos, os compromissos e as arbitragens entre o benefício da segurança regulamentada, imposta pelas normas e regras, e a perda que dela resulta para a segurança em ação, baseada na competência dos operadores.

Encontramos no autor uma ponte para os problemas relacionados à falta de supervisão e descumprimento de procedimentos operacionais, ou ainda a ausência deles, apontados na literatura como um fator contribuinte para ocorrências no pátio de aeronaves.

Para Amalberti (2016), é necessário um duplo compromisso, um no âmbito do trabalhador, denominado “micro centrado” e outro no nível da gestão da empresa, denominado “macro centrado”. O primeiro representa o compromisso cognitivo ou intelectual que o trabalhador deve gerenciar a cada momento, compondo a demanda externa com seu próprio saber-fazer, com as tarefas e motivações concorrentes e seu estado psicológico de fadiga e de estresse. O segundo modeliza as avaliações mais ou menos conscientes entre desempenho e segurança no âmbito da gestão de sistemas complexos, que o autor trata ainda como arbitragem e decisões de sacrifício.

Coloca-se a questão se o problema caracterizado na literatura em torno da necessidade de procedimentos (prescritivos) e supervisão direta não seria apenas decorrente do próprio modelo de organização do trabalho, legado das técnicas e princípios do fordismo-taylorismo.

Alternativamente, a perspectiva sociotécnica propõe reduzir a prescrição do trabalho para melhorar o campo de ação do trabalhador, com o aumento da autonomia e controle sobre o trabalho, e desenvolver sistemas de trabalho baseados em grupos semiautônomos (Trist, 1981). Parte-se do pressuposto de que é impos-

sível antecipar todas as situações e, portanto, é inviável organizar o trabalho com base apenas em regras prescritivas. Os princípios de organização do trabalho devem, portanto, apoiar o envolvimento e a autonomia dos trabalhadores, permitindo que se adaptem às diferentes situações do trabalho real, proporcionando a segurança no local de trabalho (Carayon et al., 2015).

5. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados dessa abordagem abdutiva para o problema das operações de pátio em aeroportos. A Figura 3 resume o *frame* conceitual com os princípios de funcionamento e valores esperados para solução do problema de pesquisa.

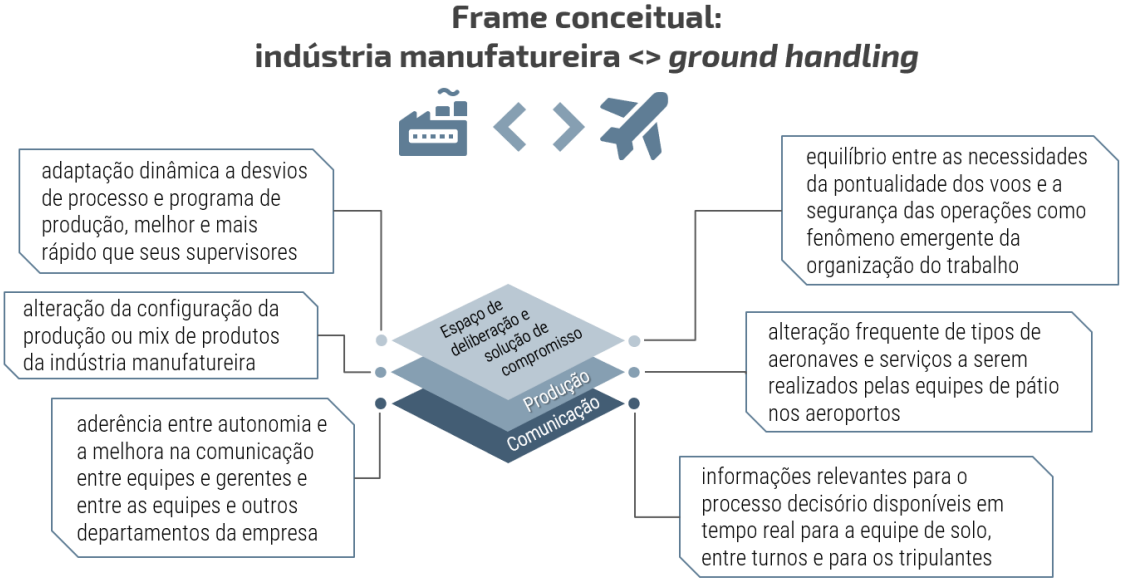


Figura 3 Frame conceitual: indústria manufatureira < > *ground handling*

Comunicação

Um dos principais fatores contribuintes para ocorrências no pátio de aeronaves, apontados na revisão sistemática da literatura, é a comunicação deficiente entre pessoal de solo, entre tripulantes e pessoal de solo ou entre turnos.

A literatura sobre autonomia e trabalho em grupo mostrou que existem exemplos bem-sucedidos na indústria manufatureira que poderiam ser utilizados no contexto das operações de pátio em aeroportos, visando a melhoria da comunicação.

Marx e Simonetti (2013) realizaram uma pesquisa quantitativa sobre grupos semiautônomos e trabalho em grupos, compreendendo 49 empresas operando no Brasil, a maioria do setor de manufatura de larga escala, e que declararam utilizar equipes com autonomia em suas operações. Os testes estatísticos revelaram aderência entre a variável autonomia e a melhora na comunicação entre equipes e gerentes e entre as equipes e outros departamentos da empresa.

O resultado quantitativo reforça estudos anteriores como de Marx (1998) e Salerno (1999), que indicam essa correlação.

Nesse sentido, há aderência conceitual de aplicação do *frame* de autonomia utilizado pela indústria manufatureira às equipes de operação de pátio em aeroportos, entregando como valor a potencial melhoria na segurança do processo, por meio de uma maior facilidade de comunicação entre trabalhadores.

Desempenho da produção

Outro resultado importante encontrado na literatura é a correlação entre autonomia e velocidade para resolver os problemas cotidianos da operação, no contexto da indústria. Essa é uma descoberta muito importante para endereçar um dos principais problemas que afetam as operações de pátio, considerando os constantes conflitos entre o tempo de *turnaround* e segurança para o pessoal da linha de frente.

A pontualidade tende a ser um dos principais valores percebidos por usuários de qualquer modo de transporte, mais ainda para o

transporte aéreo, que é caracterizado pela velocidade e transposição de longas distâncias.

Profissionais com melhor capacidade de decisão e velocidade para resolver os problemas do dia a dia da operação aliviariam a pressão do tempo para garantia da partida da aeronave no horário, considerada pela literatura como um dos principais fatores contribuintes para os acidentes e incidentes no pátio.

Resultados quantitativos obtidos por Marx e Simonetti (2013) confirmam a correlação positiva entre a autonomia das equipes e a velocidade para resolver problemas rotineiros e também problemas não rotineiros e complexos. A habilidade para resolver problemas, com menor dependência de prescrição externa direta e da supervisão, é vista como indicador da capacidade de aprendizado das equipes.

Esses resultados criam a expectativa de que equipes de pátio nos aeroportos seriam beneficiadas por uma maior velocidade para resolver problemas, com menor dependência externa, indicando que o *frame* proposto é conceitualmente adequado.

Prescritividade e supervisão

Por fim, retoma-se a discussão quanto à falta ou cumprimento de procedimentos e de supervisão. Ao contrário do que diversos autores apontam, em vez de fator contribuinte para a insegurança no pátio de aeronaves, os princípios da escola sociotécnica e de grupos semi-autônomos defendem o aumento da autonomia, visando alcançar ambientes seguros como fenômeno emergente da própria organização do trabalho em torno desses princípios.

Um importante resultado empírico de Marx e Simonetti (2013), que serve de enquadramento teórico dessa abordagem abdutiva para o problema das operações de pátio, é a correlação entre autonomia e maior velocidade e flexibilidade para responder a mudanças no programa de produção e trocas de configuração. A alteração frequente de tipos de aeronaves e serviços a serem realizados pelas equipes de pátio nos aeroportos pode ser comparada à alteração da configuração da produção ou *mix* de produtos da indústria manufatureira.

Os autores ainda apontam que os resultados encontrados para a indústria manufatureira corroboram estudos anteriores, como de Miyake (2005) apud Marx e Simonetti (2013), que estudando uma amostra de empresas japonesas do setor eletrônico encontrou evidências de que equipes com autonomia podem desenvolver capacidade superior para se adaptarem dinamicamente a desvios de processo e programa de produção.

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O pensamento abdutivo do *design thinking* forneceu uma abordagem alternativa para o problema de pesquisa do dilema entre produção e segurança no pátio de aeronaves, por meio de um *frame* que parafraseia as operações aeroportuárias no pátio com as operações de "chão de fábrica" da indústria manufatureira, entregando simultaneamente os valores de operações seguras e eficientes.

Foram aderentes no ambiente teórico as hipóteses de que a organização do trabalho com mais autonomia poderia: H1. facilitar a comunicação entre trabalhadores, melhorando a segurança; H2. aumentar a velocidade para resolver problemas, aliviando a pressão de cumprimento dos horários das operações; e H3. suprir a supervisão do cumprimento dos procedimentos operacionais, dando maior flexibilidade às equipes para responder às mudanças na configuração da operação.

A abordagem foi limitada à organização do trabalho dentro uma mesma organização, com foco em provedores de serviços auxiliares. Na realidade, as operações de pátio envolvem múltiplas organizações e tarefas, visando o processamento seguro e rápido de passageiros, bagagens e carga, além da preparação da aeronave para retorno ao voo.

A fase seguinte da pesquisa prevê a implementação dessa forma de organização do trabalho e validação quantitativa das hipóteses, por meio de indicadores de desempenho da produção e de segurança operacional.

Referências

ABESATA, 2016. Panorama dos Serviços Auxiliares de Transporte Aéreo no Brasil. Associação Brasileira de Serviços Auxiliares de Transporte Aéreo, São Paulo.

Abrahão, J.Issy., Sznelwar, L., Silvino, A., Sarmet, M., Pinho, D., 2009. Introdução à ergonomia: da prática à teoria. Blucher.

Amalberti, R., 2016. Gestão da Segurança: teorias e práticas sobre as decisões e soluções de compromisso necessárias. FMB-UNESP, Botucatu.

Balk, A.D., Bossenbroek, J.W., 2010. Aircraft Ground Handling and Human Factors, NLR-CR-2010-125. NLR Air Transport Safety Institute.

Buchanan, R., 1992. Wicked Problems in Design Thinking. Design Issues 8, 5. https://doi.org/10.2307/1511637

Carayon, P., Hancock, P., Leveson, N., Noy, I., Sznelwar, L., van Hootegem, G., 2015. Advancing a sociotechnical systems approach to workplace safety – developing the conceptual framework. Ergonomics 58, 548–564. https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1015623

Chamberlin, R., Drew, C., Patten, M., Matchette, R., 1995. Airport ramp safety and crew performance issues. Presented at the Eighth International Symposium on Aviation Psychology, OH.

Cherns, A., 1987. Principles of Sociotechnical Design Revisited. Human Relations 40, 153–161. https://doi.org/10.1177/001872678704000303

Dekker, S., 2017. The Safety Anarchist: Relying on human expertise and innovation, reducing bureaucracy and compliance, 1st edition. ed. Routledge.

Dorst, K., 2011. The core of 'design thinking' and its application. Design Studies 32, 521–532. https://doi.org/10.1016/J.DESTUD.2011.07.006

Douven, I., 2017. Abduction, in: Zalta, E.N. (Ed.), The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Metaphysics Research Lab, Stanford University.

Esteves, L.L., 2017. Indicadores de desempenho da segurança de processos nas operações de pátio em aeroportos (Dissertação de Mestrado em Transportes). Universidade de Brasília, Brasília.

European Parliament, 2018. Regulation (EU) 2018/1139.

FSF, 2019. Flight Safety Foundation. Ground Accident Prevention (GAP). Flight Safety Foundation. Disponível em: https://flightsafety.org/toolkits-resources/past-safety-initiatives/ground-accident-prevention-gap/. Acesso em: 14 jul. 2019.

Hollnagel, E., 2014. Is safety a subject for science? Safety Science 21–24. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.07.025

Hollnagel, E., 2013. A tale of two safeties. Nuclear Safety and Simulation 4.

IATA, 2022a. Global Outlook for Air Transport. International Air Transport Association.

IATA, 2022b. IATA Safety Report 2021. International Air Transport Association.

IBA, 2018. Anuário brasileiro de recursos humanos para a aviação civil. Instituto Brasileiro de Aviação Civil, São Paulo.

ICAO, 2019. Doc 10121 Manual on Ground Handling. 1st Edition.

Landry, J., Ingolia, S., 2011. Ramp safety practices. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Leplat, J., 1989. Error analysis, instrument and object of task analysis. Ergonomics 32, 813–822. https://doi.org/10.1080/00140138908966844

Lu, C., Wetmore, M., Przetak, R., 2006. Another Approach to Enhance Airline Safety: Using System Safety Tools. Journal of Air Transportation 11.

Marx, R., 1998. Trabalho em grupos e autonomia como instrumentos de competição. Atlas.

Marx, R., Simonetti, P.E., 2013. Study on the implementation of work organization in semi-autonomous groups: a quantitative survey of firms operating in Brazil. The International Journal of Human Resource Management 24, 2473–2489. https://doi.org/10.1080/09585192.2012.744333

Mumford, E., 2006. The story of socio-technical design: Reflections on its successes, failures and potential. Information Systems Journal. https://doi.org/10.1111/j.1365-2575.2006.00221.x

Reason, J.T., 2016. Organizational Accidents Revisited. Taylor & Francis, London.

Salerno, M.S., 1998. Projeto organizacional de produção integrada, flexível e de gestão democrática: processos, grupos e espaços de comunicação-negociação (Tese de Livre Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Salerno, M.Sérgio., 1999. Projeto de organizações integradas e flexíveis: processos, grupos e gestão democrática via espaços de comunicação-negociação. Atlas.

Trist, E.L., 1981. The evolution of socio-technical systems: a conceptual framework and an action research program. Ontario Quality of Working Life Centre, Toronto.

Wenner, C.A., Drury, C.G., 2000. Analyzing human error in aircraft ground damage incidents. International Journal of Industrial Ergonomics 26, 177–199. https://doi.org/10.1016/S0169-8141(99)00065-7

Williamson, T., Armour-Garb, B., 2017. Semantic Paradoxes and Abductive Methodology. Reflections on the Liar.

A 5G SIGNAL COVERAGE PROPOSAL FOR ADVANCED AIR MOBILITY

Guilherme Trindade Tolentino Bernardo*, Mayara Condé Rocha Murça, Marcelo Xavier Guterres
Aeronautics Institute of Technology, Civil Engineering Division, Air Transport and Airports

*** Corresponding author e-mail adress:** tolentinogttb@ita.br

PAPER ID: SIT155

ABSTRACT

The advent of the fifth generation (5G) of mobile networks has drawn attention to the consolidation of new use cases for Advanced Air Mobility (AAM). Thus, the 5G millimeter wave (mmWave) is paving the way to revolutionize the AAM telecommunication system by providing data at high rates and in a faster and ultra-reliable manner. However, the current trade-off between 5G in high bands (i.e., 24 GHz-40 GHz) and increased signal propagation loss makes the development of a compatible network architecture for Unmanned Traffic Management (UTM) a complex task. In this context, the main contribution of this paper is to propose a 5G signal coverage map that meets the telecommunication requirements imposed by UAV operations. First, this work investigates an appropriate communication technology for AAM advanced systems. Then, a Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) map is simulated to propose an antenna array architecture around the Aeronautics Institute of Technology (ITA). Finally, this architecture is evaluated in four different scenarios to maximize 5G radio frequency by changing antenna parameters. Simulations demonstrate that the proposed 5G antenna organizing scheme can be used to hold AAM operations efficiently and consequently improve airspace capacity.

Keywords: Advanced Air Mobility, Unmanned Traffic Management, 5G Coverage.

1. INTRODUCTION

The advancement of electronics and computer science experienced in the 21st century meant that a variety of new studies could explore the consolidation of Urban Air Mobility (UAM) operations. Another modal that encompasses UAM is called Advanced Air Mobility (AAM), which comprises, in addition to air taxi services using Vertical Take-Off and Landing (VTOL) aircrafts, delivery operations with Unmanned Air Vehicles (UAVs) (Chin et al., 2021). Thus, it is essential to understand the strict communication requirements that must exist between vehicles in order to specify AAM scenarios. In this way, the Vehicle-to-Everything (V2X) integration requires a stable and continuous network connection. As a result, several international authorities began to investigate how existent Air Traffic Management (ATM) models can integrate the future operations of an Unmanned Traffic Management (UTM) system.

In future scenarios, where airspace becomes a more limited resource to hold simultaneous operations in different ecosystems, multiple communication problems are expected due to a complex ATM. The different levels of autonomy foreseen for the AAM allied to the swarm of different types of UAVs and VTOLs sharing interposing routes requires greater cooperation and harmony between manned and unmanned airspaces (Shrestha et al., 2021). Thereby, the current UTM system requires an efficient and reliable network communication, capable of transmitting data at high delivery rates and speeds. Thus, with more aircraft to coordinate, operators must create dynamic workflows that can be controlled through a network. However, current 4th generation (4G) of mobile networks fail to meet the demands for a robust telecommunication system required by AAM (e.g., high data rate, high reliability, high coverage and low latency) (Cheng et al., 2018), which makes the development and implementation of robust systems difficult. To this integration continues to evolve and allow more devices to be connected to the network, in particular, the network on which the devices are inserted must also evolve (Bernardo et al., 2022). To overcome these problems, 5G technology has been used to facilitate both wireless broadcast and point-to-point transmissions, being an important component of Unmanned Aerial Systems (UAS) (Hosseini et al., 2019). Thereby, the recent study advances and industry interest in the application of new technologies for the transport sector are the motivation for this work. It is worth mentioning the interest of the research in knowing what is the best 5G network architecture that should be built to embed AAM applications. The main contribution of this work is to provide this 5G signal architecture based on the restrictions imposed by the UTM system.

In this paper, we provide an overview of the maturity level of the UTM sector to integrate high-tech mobile networks by describing basic concepts and challenges. In addition, a 5G antenna array architecture capable of supporting future AAM operations around the Aeronautics Institute of Technology (ITA) is presented. The 5G network signal coverage provided by this architecture is mapped to a future scenario in which there is high demand for data transmission at high frequency, to mitigate communication problems that may arise due to high airflow demand. A brief discussion of how 5G can be used to increase airspace capacity is also provided. The architecture type proposed in this paper allows the development of solutions to solve airspace capacity problems and provide better UTM communication. For the scenario studied, 5G technology is expected to facilitate the flight dynamics of autonomous vehicles by self-coordinating and readjusting their operations under the telecommunication infrastructure presented in this work.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 details the related work. Section 3 describes the 5G network planning (e.g., network layout, design, and propagation models), while Section 4 describes the simulation coverage results. Finally, Section 5 presents the conclusions and future work.

2. BACKGROUND

This section aims to present the theoretical basis of computer networks in urban mobility regarding 5G advancement and applications.

2.1. 5G Technical Requirements

The network evolution can be seen in a work that began in the 80s, in the introduction of mobile network technology with 1G. Used in the first cell phones, the transmission in the 1G network worked in an analog way, using radio signals to encode the audio, and the technology was limited to providing voice services between devices (Gawas, 2015). With the current arrival of 5G networks, there is connection support for much more devices on the network with significantly faster speeds. The 5G technology can offer a wider spectrum to attend to ever-growing demands at the highest transmission rates and lowest latencies. The key performance indicators for 5G include the user-experienced data rate, connection density, end-to-end delay, traffic volume density, mobility, and peak date rate (Jiang & Liu, 2017). These indicators provide a sense of how 5G communication infrastructure should be architected to meet these constraint scenarios and solve new challenges in mobile networks.

In addition, to better understand 5G architectures and requirements for deployment, the International Telecommunication Union (ITU) created an initiative called International Mobile Telecommunications for 2020 and Beyond (IMT-2020), which consists of recommendations (e.g., 5G radio regulations, operational aspects, performance, and test specifications) for 5G deployment. ITU has released the vision recommendation (Series, 2015) and defined the values for each key capabilities of 5G shown in Table 1.

Table 1 5G key capabilities and values from ITU-R. Source: Series, 2015

Key capabilities	Values
Peak data rate	20 Gbps
User experienced data rate	0.1-1 Gbps
Latency	1 ms over-the-air
Connection density	10^6users/km^2
Area traffic capacity	10 Mbit/s/m^2

It is therefore worth emphasizing the need to understand what type of structure makes up the 5G architecture. To the AAM demands, society must reach a new level in communication technologies, being able to transmit signals in new frequency bands. These frequency bands, called millimeters waves (mmWave), are considered a key technology for 5G wireless communications (Huang et al., 2017). The mmWave systems have frequency ranges between 20 and 300 GHz (Khan et al., 2021) where a total of around 250 GHz bandwidths are available (Bogale et al., 2017). However, this frequency spectrum causes the signal propagation loss to be high, which significantly reduces the range of 5G signal coverage. Those issues inherent to mmWave communication can be bypassed through the configuration and optimal arrangement of antennas for signal propagation.

The UTM systems must be optimally coordinated and based on efficient trajectories, in addition to the need for them to be endowed with accurate avoid-collision systems. Intending to better understand this technology and applications for these scenarios, Li et al. (2018) conducts an extensive literature review on 5G technology and future trends for UAV communication. Furthermore, it is worth mentioning a very important study area for the consolidation of the use of mobile networks, which consists of mapping and positioning 5G antennas efficiently.

Having seen the 5G key capabilities presented, is expected a sturdy telecommunication system to support AAM operations. This system must be designed to provide low-cost solutions, minimize traffic congestion faced by terrestrial infrastructure and create new economic opportunities for the consolidation of a V2X model. Some recent applications designed for V2X based on state-of-the-art in mmWave communication networks will be presented in the next section.

2.2. 5G Networks Applied to V2X scenarios

In a futuristic urban mobility perspective with the AAM deployment, remote control is more consistent with the use of wireless networks. For the context of urban mobility, wireless communication technologies applied to small areas are not suitable for the wide range of devices connected on the network, what prompts the study of the best network architectures to be used in forthcoming scenarios.

Chin et al. (2021) tested different optimal congestion management algorithms to supply satisfactory operations in an AAM scope. They developed a robust protocol based on decentralize information to avoid gridlocks in the system and increase airspace capacity in a congested volume scenario. They reached at an efficient solution that has relevance to the problem of coordination and control of traffic, what is much expected by network technologies with the increasing deployment of connected autonomous vehicles.

Rodriguez et al. (2021) presented a framework to optimize 5G-integrated autonomous mobile robots. Using a 5G emulator and a wireless multi-access gateway they could focus on its overall 5G control and edge-cloud operation. As a result, it was possible to see that this 5G operation was superior in terms of control-loop reliability compared to a Wi-Fi 6 architecture, what shows the 5G potential and reliably to operate autonomous mobile robots.

In addition to the aforementioned challenges related to V2X communication through 5G, which is also faced by AAM, the mobile network technology must deal, due to its current structure, with several external problems. Challenges related to signal attenuation on rainy days (Drozdy et al., 2016), the difficulty in penetrating the signal in obstacles, (e.g., vehicles, constructions, and signal diffraction) can affect negatively the quality of transmission. Because of such the problems exposed, the advanced architecture that is thought for the AAM deployment must be smart enough to ensure operation safety. In this way, the interest in optimizing this architecture increases as seen in recent studies on Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC), which are paving the way for UAVs remote control. Thus, due to the increase of connected UAVs in URLLC modes, it is expected for the next few years overhead in airspace capacity. The dense UAV transport systems emerge as an increasingly important task to understand the current telecommunication infrastructure.

In this work, an antenna mapping infrastructure was simulated to provide a 5G coverage signal around ITA. From the point of view of a typical AAM scenario, the mapping proposed in this paper can be used to accurately plan the cell site locations to provide uniform 5G coverage. Previous works attempted to use 5G frameworks to compute network metrics that guarantee a feasible operation of autonomous vehicles. This work, on the other hand, uses the 5G radio signal considering the interference between the antennas to identify the best cell site arrangement. Besides that, it was considered appropriate cell site parameters (e.g., bandwidth, carrier frequency, transmit power) for each transmitter, according to what is seen in the literature as efficient for scenarios involving UAVs. Finally, all planned cell positions are deployed using a signal simulation around ITA map to analyse the proposed placement of the antennas.

3. METHODOLOGY

The 5G network requires full coverage for reliable data transmission so that it is available at any time for an AAM application. For this, there must be an optimal network coverage plan that takes into account all the 5G technical requirements and can deliver transmission quality to the end user. Network coverage refers to the entire area around the base station (i.e., cell site), where the air vehicle can request any service on the network and successfully connect to the cell site to receive the response to its request. In turn, the cell radius is defined as the maximum distance a UAV can connect with a 5G cell without losing communication. Thus, it is possible to estimate, for a predetermined area, the number of cells needed to perform the signal coverage. For this 5G coverage mapping simulation, it was considered an inter-site (ISD) distance of 100 meters shown in Fig. 1, since it is leading with a high frequency band, designed for a small coverage.

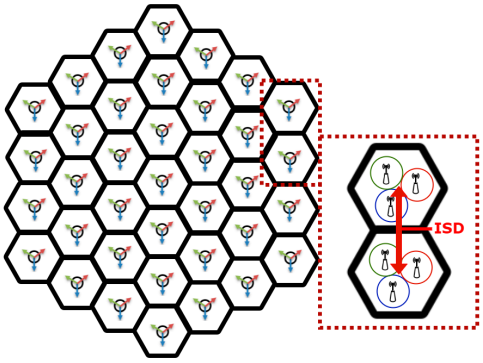


Figure 1 5G network layout with 37 cell sites, each with three sectors.

In higher frequency bands, it can be seen the increase of free space propagation loss, which will limit the individual cell site radius to 100 meters for the high-frequency band compared to several kilometers in 4G (Ahamed & Faruque, 2021). A UAV, during its flight, can receive more than one dominant signal from nearby cells if the ISD is not maintained (i.e., out-of-cell interference), which degrades the network performance and, consequently, the optimally of the air vehicle flight, which can lead to collision problems with other UAVs. As soon as the AAM telecommunication infrastructure operator deploys several 5G cells in a region, it must find the best antenna array parameters that maximize the signal coverage.

This paper assumes a future scenario based on the urban environment with high demand for data and transmission speed. This type of scenario is called a dense urban-Enhanced Mobile Broadband (emBB) (Hassani-Alaoui & El Abbadi, 2019). More specifically, a scenario with high user density and traffic loads around ITA. The area was chosen due to the great interest in the maturation of technology, being a public university institution linked to the Brazilian Air Force (FAB). In addition, ITA covers an area of great economic impact in the state of São Paulo and is located within the Aerospace Department of Science and Technology (DCTA) campus. DCTA also encompasses São José dos Campos International Airport (ICAO: SBSJ), giving the area a periodicity in air traffic demand. The test environment is based on the guidelines defined in the ITU-RM report (Series, 2017) to evaluate 5G radio technologies, which suggests regular scheme antenna positioning taking the form of a hexagon. The layout consists of 31 sites, each with 3 cells, placed in a hexagonal layout to cover the ITA area, as shown in Fig. 2.

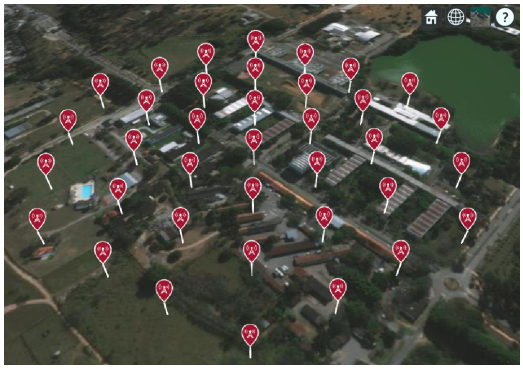
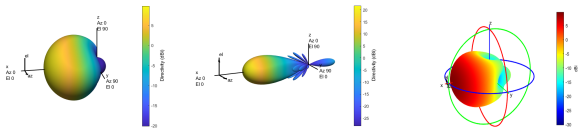


Figure 2 Antenna mapping model around ITA campus.

In this way, each cell site is composed of three 5G signal transmitters (i.e., sectors), so that each transmitter can be represented by a single antenna element or by an antenna array containing n antenna elements. Since the 5G mobile network works with very high-frequency bands, a large number of antennas can be integrated into a single array. Therefore, an array can be defined as two or more connected antennas that transmit the signal together as a single antenna element. Figures 3a, 3b and 3c shows the 3D radiation pattern of a 5G antenna with a single element, with 8-by-8 antenna elements and considering a patch antenna model as the array element provided by MATLAB.



(a) Single element. (b) 8-by-8 array. (c) Patch antenna.

Figure 3 Comparison of the 3D radiation pattern of different 5G antennas.

In general, the single element antenna delivers a low gain radio waveband, while the propagation pattern of an antenna array delivers a narrower and more direct waveband, consequently with higher gain, which is indicated for this AAM scenario of long-distance communication between UAVs. Configure the best antenna placement for 5G signal maximization it is considered to be a very complicated task, as positioning needs to induce as little interference damage as possible in existing mobile network systems.

Considering a level of technology maturation where the transmitted 5G waveform has already been generated and affected by the propagation channel, it is interesting to evaluate how to optimally arrange the antennas to map the 5G signal for AAM use cases. To coverage largest area with optimal cost, solutions can be created to maximize the signal from the network antennas in a certain directions. One of these techniques, called beamforming, use the processor in conjunction with an array of sensors to provide a versatile form of spatial filtering (Van Veen & Buckley, 1988). Being able to cancel noise and interference, this technique allows different access points to be arranged in a way to maximize

the coverage area. In scenarios where there is a blockage, an antenna is able to pass the request of a UAV promptly to another antenna closer within the same cluster. In this paper, the beamforming technique was adopted to maximize the signal gain by the antennas.

In order to create and compare different 5G antenna placements, it was used a product to simulate, analyze and test 5G communication systems. The 5G Toolbox is an open-source tool available at MATLAB. The framework used the Phased Array System Toolbox to create hexagonal cell network as well as the custom antenna array. Through this tool, it was possible to construct a 5G urban macro-cell test environment to ensure the ubiquitous coverage area required for AAM operations and visualize the Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) on a map for different antennas, assuming that the UAVs will be arranged uniformly and randomly above the sites and hexagonal cells. SINR is a term considered for expressing the measure of a signal quantity combined with noise and interference, serving as an essential parameter to understand the quality of an incoming signal in radio frequency systems (Panigrahi et al., 2020).

This paper follows the guidelines of IMT-2020 for the 5G network planning and coverage simulation (Series, 2017), but some of the parameters needed to be manually adapted to better fit in UAS use cases. For example, it used a 100 m ISD that is smaller than the 300 meters presented, a carrier frequency of 28GHz instead of 4GHz, and a transmit power of 43 dBm, considered suitable parameters for URLLC scenarios for UAVs (Khan et al., 2020). The signal radiated by the transmitter spreads across the atmospheric air and propagates from the antenna to the receiver (i.e., VTOL, UAV). The amount of signal attenuation depends on several factors (Ahamed & Faruque, 2021), such as carrier frequency, cell site location, antenna height, and distance between transmitter and receiver.

Table 2 shows parameters used in the simulator to ensure network efficiency around the ITA. For all four scenarios, were used in the simulation 3 sectors of signal propagation, a 15° downtilt angle, and transmitter antennas of 25 meters.

Table 2 Parameters used in simulation.

Parameters	Value
Number of cell sites	31
ISD	100 m
Bandwidth	250 MHz
Carrier frequency	28 GHz
Total transmit power	43 dBm

Thus, to evaluate the defined parameters, four scenarios were used, which will be described below.

- **Scenario #1: SINR map for single antenna element**. The first scenario could be used for an architecture that does not require continuous coverage for data traffic, with lower cost and a free propagation scenario (e.g., 5G network application in the academic environment for small tests and simulations to remote control of Small Unmanned Aerial Vehicles (SUAVs). For each location on the map within the range of the transmitter sites, the signal source is the cell with the greatest signal strength, and all other cells are sources of interference.
- **Scenario #2: SINR map for 8-by-8 antenna array**. The second scenario applies mechanical downtilt, which consists of physically adjusting the antenna mounting brackets to obtain an accurate measurement around each transmitter to better visualize the signal propagation. In this scenario, a rectangular antenna array can provide greater directionality and peak SINR values than when using a single antenna element.
- **Scenario #3: SINR map using close-in propagation model**. The third scenario deals with situations where there is a need for strict network requirements for the UTM system control. This model produces an SINR map that shows reduced interference effects compared to the free space propagation model used in the other scenarios. The close-in propagation model is a path loss for different 5G use cases.
- **Scenario #4: SINR map for 16-by-16 antenna array**. The fourth scenario seeks to

extend the analysis by using a 16-by-16 antenna array. This type of architecture allows the analysis of the feasibility of specific signal coverage for AAM that fully meets the network availability, reliability, and data rate. This scenario is expanded to test how the number of transmitters per cell, the antenna downtilt angles, and the antenna height can affect the quality of the radio frequency signal.

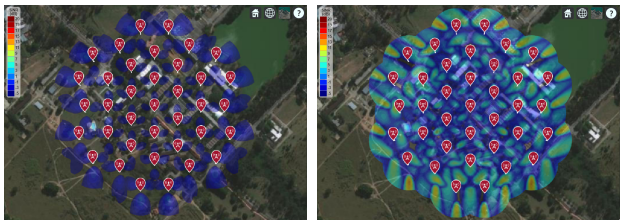
The free space propagation loss is much higher when dealing with high-frequency bands like 5G. In this way, the mmWave network architecture must consider noise and interference in signal mapping. The signal maps generated with the simulator will be displayed in the next section.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this paper, a signal map is generated to estimate 5G network coverage using the free space propagation model. In this section, the results of the 5G network coverage simulation will be presented, where the ITA will be considered as an implementation area. The simulated network coverage and the SINR are presented together with Google Maps for better geolocation of the studied area since the simulator considers the region topography (i.e., altitude).

In the first case, Fig. 4a shows a visualization of the SINR area coverage map with colored communication using a single antenna element and a free space propagation model. The SINR map uses a scale ranging from -5 to 20 dB, where warmer colors indicate greater signal strength. Each one of the 31 sites has three transmitters corresponding to each cell. Thus, the antenna angle of the transmitters is positioned in an appropriate direction offset by 120º each. Since SINR is used to estimate the quality of the network connections, areas with an SINR value less than or equal to 0db represent no signal presence, while blank space areas within the network indicate areas where the SINR is below the default threshold of -5 dB. These areas do not have the minimum required SINR, creating a coverage gap for the UAVs. Due to the lack of signal strength, it is not a viable architecture for AAM-dense operations.

To increase the directional gain and the peak SINR value, it was used in a second case an 8 x 8 rectangular antenna array. Figure 4b shows this scenario in an extended coverage area map, where the configuration allows a gain in an oriented wave range.



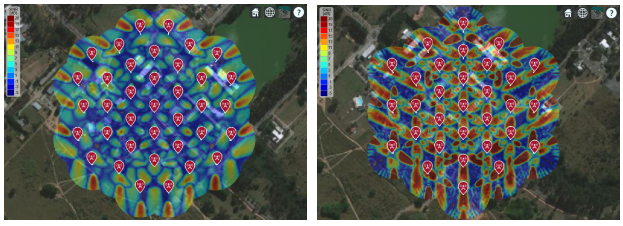
(a) Scenario #1. **(b) Scenario #2.**

Figure 4 Comparison of the SINR maps for the first two scenarios.

As shown, there are less blank spaces in the map, which indicates results with higher SINR values due to less interference. A high gain can be observed as the number of antenna elements increases. As the gain grows with the size of the antenna array, the SINR value will also increase, improving the overall performance of the network. However, this type of architecture is also not the best for AAM operations, as there are still several areas that do not have radio frequency coverage for the 5G network.

More over, it was simulated a test scenario using the close-in propagation model described by Sun et al. (2016). As can be seen by Series (2017), the antenna element needs to provide a maximum gain of 9.5 dBi and a front-to-back ratio of approximately 30 dB (i.e., narrowed beam). In order to evaluate the improvement of the signal coverage, in this scenario the equation-based antenna element definition was replaced by a real antenna model through Antenna Toolbox in MATLAB. It was possible to see the same gain provide by the antenna element, although with a lower front-to-back ratio. The SINR map using close-in propagation model is shown in Fig. 5a.

However, better coverage can be seen by adding a 16-by-16 array antenna for each transmitter as shown in Fig. 5b. The gain provided by this antenna configuration shows that as the number of elements in the array grows, higher SINR values can be seen, which is required by the 5G network.

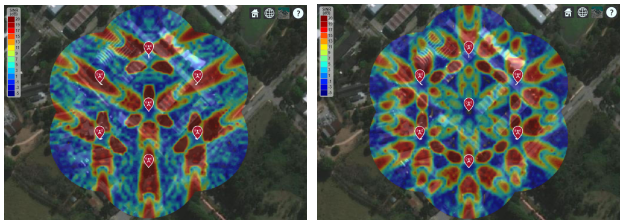


(a) Scenario #3. **(b) Scenario #4.**

Figure 5 Comparison of the SINR maps for the last two scenarios.

Thus, for better signal coverage to meet AAM expectations, 5G network requires higher SINR values. One observed way to achieve the desired coverage is to increase the array antenna size for each cell site. As much as the architecture using 16-by-16 array significantly improves the signal, one can observe a gain directed through a narrow beam of radiation. As seen in the SINR map for scenario #4, some areas still suffer signal variation, which can significantly impact the performance of autonomous flight operations.

In order to further improve the signal coverage, the number of sectors (i.e., transmitters) per cell site can be increased. As the 16-by-16 matrix configuration propagates the signal in a very narrow and highly directed format, the use of six sectors can be applied instead of three. Figure 6a shows the SINR map of a 16-by-16 array with three sectors, while Fig. 6b deals with a cell architecture of six sectors. All antenna configuration parameters remain the same as those presented for the previous scenarios. However, for better signal visualization, the number of cell sites adopted is 7 instead of 31.

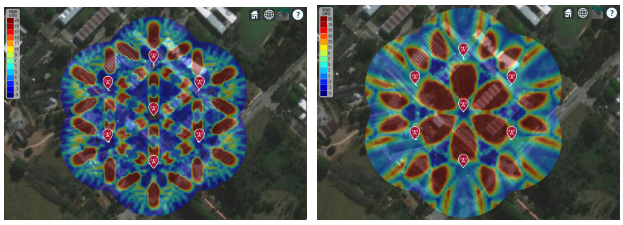


(a) 16-by-16 array with 3 sectors. **(b) 16-by-16 array with 6 sectors.**

Figure 6 Signal strength and coverage when varying sectors.

The average level of signal coverage increases as more sectors are added to each cell. Still, coverage is not evenly distributed over most areas, which means that some places do not have adequate radio frequency propagation for AAM. To further optimize the 5G signal coverage, the scenario was tested with six sectors and different antenna inclination angles.

The antenna downtilt method is one of the most effective for controlling the radiation beam (Molisch, 2012). Figure 7a shows signal coverage for a 16-by-16 array architecture and six sectors offset by 60º each and 25º mechanical downtilt, while Fig. 7b presents the SINR map for a 5º mechanical downtilt angle on the antenna brackets.

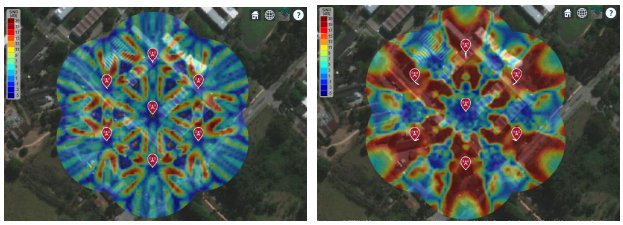


(a) 25º antenna downtilt angle. **(b) 5º antenna downtilt angle.**

Figure 7 Signal strength and coverage when varying antenna downtilt angle.

It is possible to verify that a 5º angle promotes better radio frequency coverage than a 25º, with signal in areas close to the central antenna above 15dB, which is very good for a 5G network coverage.

Also, the transmitter antenna height directly impacts the signal coverage. Figure 8a presents, under the same parameters as the previous scenario shown in Fig. 7b, the SINR map for an architecture that uses 10 meters antennas. As a comparison criterion, Fig. 8b shows the radio frequency coverage for 40 meters antennas.



(a) 10 meter antennas. **(b) 40 meter antennas.**

Figure 8 Signal strength and coverage when varying antenna height.

The RF signal is better for higher antennas, as can be seen by comparing Fig. 8a with Fig. 8b. In a scenario with the dense movement of autonomous flying vehicles, this type of setup makes the most sense as the signal will be propagated mostly high up, where AAM operations take place most of the time.

In short, the cell layout architecture to support operations involving remotely controlled UAV flights is more efficient when it contains more spaced sectors, to spread the signal evenly. As such AAM operations involve a URLLC network and high frequencies, it is essential to evaluate better antenna parameters matching such as those presented here. The downtilt angle of the antenna brackets, the antenna's height, and the optimal number of sectors per cell are essential requirements for system development, which must be treated carefully through studies and tests. By using Google Maps terrain profile data, the results depend on the terrain data maintenance and updating. The results presented can be used as a comparison criterion for future deployment of 5G antennas around ITA. The main discussions about the challenges of implementing a 5G signal coverage for AAM, as well as the conclusions obtained from this work, can be seen in the next section.

5. CONCLUSION

The present work allowed us to evaluate a 5G signal coverage that meets the future demands of AAM. For the upcoming fifth-generation networks' usefulness in this type of transport mode, there is an urgent of design a radio frequency coverage architecture capable of supporting URLLC traffic. In this sense, the high-frequency bands of 5G (i.e., mmWave) are well suited for application in several use cases that involve data traffic between AAM applications (e.g., UAVs, SUAVs, VTOLs) and with a ground infrastructure. The simulation framework presented in this work allowed the spatial evaluation of mmWave availability by generating beamforming signals and providing high signal gain and coverage. The overall goal was to provide an architecture based on the network characteristics that an AAM communication system must have to work optimally. To achieve this goal, we performed tests with beamformed mmWave in four scenarios explored in this paper. Through the SINR maps generated for the area around ITA, the designer of a future 5G network architecture can evaluate the best antenna arrangement that mitigates the propagation loss and sensitivity to blockage, which are mmWave characteristics.

This paper presents a 5G coverage planning applicable to different parameters, such as the transmitter design (i.e., single element, array), network layout (i.e., number of cells, ISD, number of sectors), propagation modeling, and antenna layout (i.e., downtilt angle, height). The results show that the better spaced the transmitters are for each cell site, the better the radio frequency coverage of the 5G spectrum. Understanding the communication infrastructure, its relationship with the environment, and the amount of AAM operations that must take place is the first step towards achieving the desired scenario in a futuristic mobility model. For future work, we plan to simulate and statistically analyze the airspace capacity covered by the different infrastructure scenarios presented. With this analysis, it will be possible to compare different UAV routes that maximize the SINR value through optimal 4D trajectories and minimize overlaps for AAM operations security.

References

Ahamed, M. M. & Faruque, S. (2021). 5g network coverage planning and analysis of the deployment challenges, Sensors 21(19), 6608.

Bernardo, G. T. T., Miranda Jr, G. & Macedo, D. F. (2022). Analysis of network performance over deep reinforcement learning control loops for industry 4.0, Proceedings of XL Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems, SBC pp. 1–14.

Bogale, T., Wang, X. & Le, L. (2017). Chapter 9 - mmwave communication enabling techniques for 5g wireless systems: A link level perspective S. Mumtaz, J. Rodriguez & L. Dai, eds mmWave Massive MIMO, Academic Press pp. 195–225.

Cheng, J., Chen, W., Tao, F. & Lin, C.-L. (2018). Industrial iot in 5g environment towards smart manufacturing, Journal of Industrial Information Integration 10, 10–19.

Chin, C., Gopalakrishnan, K., Balakrishnan, H., Egorov, M. & Evans, A. (2021). Protocol-

based congestion management for advanced air mobility, Fourteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar.

Drozdy, Á., Kántor, P. & Bitó, J. (2016). Effects of rain fading in 5g millimeter wavelength mesh networks, Proceedings of 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE pp. 1–5.

Gawas, A. U. (2015). An overview on evolution of mobile wireless communication networks: 1g-6g, International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication 3(5), 3130–3133.

Hassani-Alaoui, F. Z. & El Abbadi, J. (2019). 5g network construction in dense urban environment: Rabat-agdal case study, Proceedings of Proceedings of the 4th International Conference on Big Data and Internet of Things, pp. 1–8.

Hosseini, N., Jamal, H., Haque, J., Magesacher, T. & Matolak, D. W. (2019). Uav command and control, navigation and surveillance: A review of potential 5g and satellite systems, Proceedings of 2019 IEEE Aerospace Conference, IEEE pp. 1–10.

Huang, J., Wang, C.-X., Feng, R., Sun, J., Zhang, W. & Yang, Y. (2017). Multi-frequency mmwave massive mimo channel measurements and characterization for 5g wireless communication systems, IEEE journal on selected areas in communications 35(7), 1591–1605.

Jiang, D. & Liu, G. (2017). An overview of 5g requirements, 5G Mobile Communicationspp. 3–26.

Khan, S. K., Farasat, M., Naseem, U. & Ali, F. (2020). Performance evaluation of next-generation wireless (5g) uav relay, Wireless Personal Communications 113, 945–960.

Khan, S. K., Naseem, U., Siraj, H., Razzak, I. & Imran, M. (2021). The role of unmanned aerial vehicles and mmwave in 5g: Recent advances and challenges, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies 32(7), e4241.

Li, B., Fei, Z. & Zhang, Y. (2018). Uav communications for 5g and beyond: Recent advances and future trends, IEEE Internet of Things Journal 6(2), 2241–2263.

Molisch, A. F. (2012). Wireless communications, John Wiley & Sons, University of Southern California.

Panigrahi, S. S., Mishra, G. P. & Mangaraj, B. B. (2020). Antenna array beam scanning and sinr visualization on a map for 5g urban macro-cell test environment, Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), IEEE pp. 107–111.

Rodriguez, I., Mogensen, R. S., Fink, A., Raunholt, T., Markussen, S., Christensen, P. H., Berardinelli, G., Mogensen, P., Schou, C. & Madsen, O. (2021). An experimental framework for 5g wireless system integration into industry 4.0 applications, Energies 14(15), 4444.

Series, M. (2015). Imt vision–framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond, Recommendation ITU 2083, 21.

Series, M. (2017). Guidelines for evaluation of radio interface technologies for imt-2020, Report ITUpp. 2412–0.

Shrestha, R., Bajracharya, R. & Kim, S. (2021). 6g enabled unmanned aerial vehicle traffic management: a perspective, IEEE Access 9, 91119–91136.

Sun, S., Rappaport, T. S., Thomas, T. A., Ghosh, A., Nguyen, H. C., Kovács, I. Z., Rodriguez, I., Koymen, O. & Partyka, A. (2016). Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5g wireless communications, IEEE transactions on vehicular technology 65(5), 2843–2860.

Van Veen, B. D. & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering, IEEE assp magazine 5(2), 4–24.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR RTOS AIDED BY KANBAN METHOD

Alexandre, T. M.; Almeida Jr, J. R.
Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais

*** Corresponding author e-mail address**: t.alexandre@gmail.com

PAPER ID: SIT146

ABSTRACT

The purpose of this paper is to promote the usage of the Kanban method for the development of RTOS (real-time operating system) usually used in avionics, nautical and automobile industries. The paper takes the form of a literature study. Kanban method has been aiding the development of software in several industries such as healthcare, financial, communication manufacturing and retail. There is an enormous potential and opportunity in ROTS industry. All the Kanban benefits observed in other industries may be discovered in RTOS development process as well.

Keywords: Kanban, RTOS, software development.

1. INTRODUCTION

The Kanban method applied to software development has been highlighted in the literature since 2010 with some studies and experience reports being published. In mid-2013, it was still not possible to reliably determine its impacts, however, the method was already demonstrating to deliver customer satisfaction, reduction of reported defects, improved communication, improved visualization of work in progress and some recommendations such as: introducing the method incrementally, accompanying the board with daily meetings and providing appropriate training to all those involved. (Ahmad, Markkula, & Oivo, 2013)

More recently, new studies and experience reports have endorsed these impressions about the method, in addition to listing more recommendations on how to always apply the Kanban board with other complementary tools such as cumulative flow diagrams, metrics report and other graphs. (Ahmad, Dennehy, Conboy, & Oivo, 2018)

In RTOS (*real-time operating system*), Kanban has been applied to eliminate waste by improving the visualization of the process as it highlights the bottlenecks of the production or development system. (Simić, et al., 2021) Many embedded real-time systems are necessary for aeronautics that, from the 1990s, adopted the BFP (*better, faster, cheaper*) paradigm and the Lean to produce your products. (Murman, Walton, & Rebentisch, 2000)

This article is structured as follows: Section 2 presents an overview of Kanban as a software development method. The growth and use of Kanban in the software industry is described in section 3. Some examples of Kanban usage in RTOS are listed in section 4, and finally, in section 5, the conclusion and future work are presented.

2. KANBAN AS A SOFTWARE DEVELOPMENT METHOD

The Kanban method, although it has established principles that characterize it, still needs a unification in relation to the construction of knowledge in the scientific environment. Non-peer-reviewed publications, books and guides vie for attention in the market and experience reports need more rigor in terms of how they address the threats and risks of the method. (Ahmad, Dennehy, Conboy, & Oivo, 2018)

The first publication on the introduction of Lean in software development is attributed to (Poppendieck & Poppendieck, 2003). The Kanban method, proposed by (Anderson D. J., 2010), derives from *Lean* and incorporates other elements

2.1. DEFINITION

Kanban is an evolutionary project tracking method that uses a kanban, (lowercase k), and other tools to visualize a pull system to apply *Lean* ideas to the technology development process as well as information technology operations. (Anderson D. J., 2010)

At its origin, Kanban was based on 3 principles: 1. Visualize the workflow; 2. Limit work in progress; 3. Manage the flow. (Hammarberg & Joakim, 2014)

Visualizing the workflow allows to identify bottlenecks and propose solutions. These proposals lead to small improvement actions that can be continuously implemented and tested.

Limiting work in progress leads to balance the amount of work against the amount of contributors to improve the delivery rate. In this principle, (Anderson D. J., 2010) relied on Little's Law of the simplified queuing theory of (Leon-Garcia, 2008):

$$Q_i = \lambda_i R_i \qquad (1)$$

Where Q_i is the average number of entities in the queue, λ_i is the arrival rate and R_i is the average response time.

Translating to the context of software development:

Work in progress = task completion rate *x* average development time.

The average development time is a difficult variable to change because it involves several factors such as the number of people on the team, the capacity of these people, availability, and other productivity factors.

Thus, from (1), the simplest way to increase the rate of task completion is to reduce work in progress.

Flow management consists of keeping activities that deliver value to achieve the customer's purpose in progress without impediments or queues. Anything that does not generate value in the eyes of the customer should be considered as waste. Daily meetings, reassigning more people to the same task that is more technically difficult, dividing complex tasks into tasks that are simpler to understand and faster to execute are some activities related to flow management. (Hammarberg & Joakim, 2014)

2.2. IMPLEMENTATION

One of the ways to implement Kanban is to apply eight steps not necessarily chronological proposed (Anderson D. J., 2010) and detailed by (Burrows, 2014) called *STATIK* - Systems Thinking Approach to Introducing Kanban. The steps are: 1. Adapt the service to the client's purpose; 2. Understand the sources of dissatisfaction with the current system; 3. Analyze demand; 4. Analyze capacity; 5. Model the workflow; 6. Discover the classes of service; 7. Design the kanban system; 8. Publicize and negotiate the implementation of the method with the stakeholders. Each of these steps is detailed in the following sections.

2.3. MAKE THE SERVICE FIT FOR PURPOSE FOR THE CUSTOMER

This step refers to exploring all the satisfaction criteria that are important to the customer. Some criteria to be followed are quality, predictability of deliveries, security, service level agreements, regulatory issues, among others. The clearer the goals and needs of the client are, the greater the chances of success and delivery according to their expectations. (Anderson & Zheglov, 2017) propose two ways to know the client's purpose: 1. Through narratives; 2. Through research and data. The first approach relies on the human ability to tell and interpret stories. The second contains data for measurement and analysis. These approaches are complementary and help to understand the client's purpose and quality criteria for each type of service.

2.4. UNDERSTANDING THE CURRENT SYSTEM'S SOURCES OF DISSATISFACTION

At this stage, dissatisfaction can be observed, both internally (developers, quality team, support team) and externally (customers, suppliers). A technique for collecting dissatisfaction described by (Burrows, 2014) consists of the following steps: 1. Individuals write down their dissatisfaction with a short sentence on a small self-adhesive paper anonymously; 2. The papers are placed on a board and grouped according to their similarity in small groups; 3. The groups are named so as to logically represent the dissatisfaction they represent; 4. Each individual receives 3 to 5 votes to distribute in the cluster. With this technique, individuals can better reflect on the problems they face and begin to propose suggestions for process improvement. From experience, (Burrows, 2014) warns that some dissatisfactions can hide others. For example: Dissatisfaction about lack of time can hide communication, coordination, or quality problems. At this stage, it is recommended to explore needs and not assume hasty solutions.

2.5. ANALYZE CAPABILITY AND DEMAND

In this stage, demand analysis is carried out, which consists of collecting information about each type of task, volume, and arrival rate of each item and understand these values and how important they are to the customer. As for capacity, collect historical data, if available, on delivery times, time for each task, quality, predictability, and regulatory requirements. (Senapathi & Drury-Grogan, 2021)

This analysis should generate quantitative and qualitative data. If possible, use graphs such as *Lead Time*, shown in Figure 1 and *CFDs* - cumulative flow diagram.

.

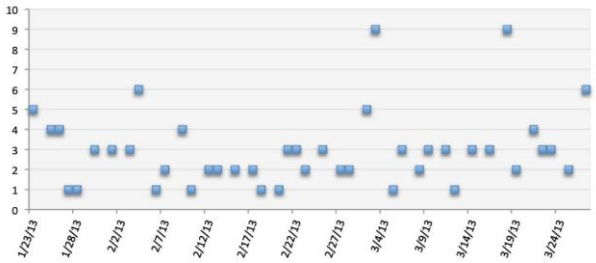


Figure 1 Lead Time. Source: (Burrows, 2014)

2.6. MODEL WORKFLOW

A common approach to this activity is the top-down decomposition. In this approach, 3 parts are chosen that divide the process: "to do", "in progress", "done" and then begins the decomposition of each part in details of the process until a table is built where each column represents a stage of the development process. (Burrows, 2014) The columns in Figure 2 exemplify the breakdown of these parts in some activities.

to do		in progress			done	
backlog	selected	under development	ready to test	in test	waiting deploy	deployed

Figure 2 Model workflow. Source: Adapted from (Anderson D. J., 2010)

2.7. DISCOVER CLASSES OF SERVICE

The Kanban method uses the concept of service classes that are defined based on the business risk that the tasks have. In particular, the cost of delay. (Anderson & Bozheva, 2021) Which classes to determine is a particular design decision. However, there are four main categories that can be cited: 1. Urgent or Priority: tasks that need immediate attention; 2. Fixed date: tasks that have a date that, if not fulfilled, will imply a strong penalty; 3. Intangibles: Tasks with no attached business value, but with medium to long-term value potential; 4. Standard or common: The remaining tasks prioritized according to the value they bring to the customer. (Anderson & Bozheva, 2021)

2.8. DESIGN THE KANBAN SYSTEM

The Kanban board design considers the service classes as horizontal demarcations as shown in Figure 3 and the development steps as columns

Project A	to do		in progress			done	
	backlog	prioritized	under develop-ment	ready to test	in test	waiting deploy	deployed
wip limits >>		3	3	3	2	4	-
Urgent							
Standard							

Figure 3 Kanban board. Source: Adapted from (Anderson D. J., 2010)

The limitation of work in progress (WIP) needs to be imposed through some mechanism (Burrows, 2014) as it is part of one of the principles of the method. The highlighted line in Figure 3 is an example of a work-in-progress control mechanism. The numbers indicate the number of tasks, represented by yellow cards, that can exist in each column that represents a step in the process. So, to pull a new task from the "prioritized" list, it is necessary that the number of tasks under "in development" column be less than three and so on in all fields with constrains.

After a few weeks of follow-up, it will be possible to extract the cumulative flow diagram (CFD).

The CFD is useful for viewing a series of information relevant to the progress of the project, serving as a background for discussions of process improvements, being the most used diagram, making it possible to identify WIP, total development time (lead time) and bottlenecks. in the flow. (Corona & Pani, 2013) The analysis of this graph shows the relationship between WIP and lead time, that is, the throughput rate. In the graph of Figure 4, the slope is the throughput. The height is WIP, and the length is lead Time.

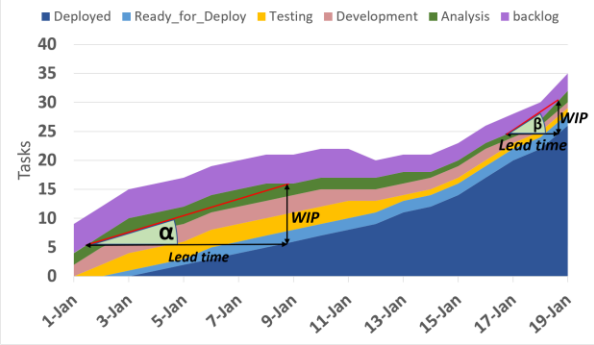


Figure 4 *CFD* Source: Adapted from (Anderson & Bozheva, 2021)

From (1) and the analysis of the CFD graph, it is possible to calculate the throughput dividing the WIP by the Lead Time which is the same as observing the tangent of α and β.

$$throughput = \frac{WIP}{Lead\ time} \qquad (2)$$

From the symmetrical scale of the graph or from (2), it is possible to observe that tan(α) is greater than tan(β) meaning, the delivery rate is higher on days when the WIP is lower. This brings up an important talking point for the team to assess what WIP value makes the flow go faster. (Hammarberg & Joakim, 2014)

2.9. SOCIALIZE THE DESIGN AND NEGOTIATE EXPECTATION

Kanban does not provide a time-based delivery period, but rather, it predicts that the main activities and functionalities that were prioritized by the customer are delivered as soon as possible, which has been shown to be totally feasible. (Birkeland, 2010) Therefore, all those involved, managers, developers and testers must participate in the implementation process by providing feedback and proposing improvements. (Nikitina, Kajko-Mattsson, & Stråle, 2012) It is necessary to build a shared understanding of the purpose, process, and associated problems. Suggest improvement actions based on scientific models and seek agreements by consensus to continually evolve. (Anderson & Bozheva, 2021)

3. THE USAGE OF KANBAN METHOD IN THE SOFTWARE INDUSTRY

In the manufacturing industry, where Kanban has been applied for several decades, (Ikonen, Pirinen, Fagerholm, Kettunen, & Abrahamsson, 2011) it has been observed a resulting facilitation of the application of Lean principles, in a simple and effective way.

In the software industry, Kanban has lower penetration compared to other development methods and practices, despite the fact that academic interest in the method has grown consistently as (Ahmad, Dennehy, Conboy, & Oivo, 2018) show in Figure 5.

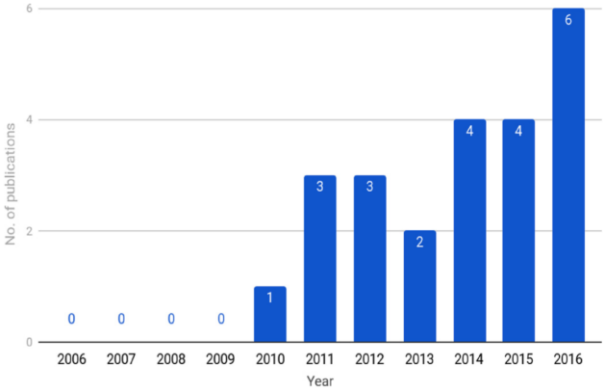


Figure 5 Publications about the Kanban method. Source: (Ahmad, Dennehy, Conboy, & Oivo, 2018)

These 23 articles, 8 in journals and 15 in conference proceedings, were selected from 382 works as primary studies on the Kanban method after a careful filtering in the systematic mapping study by (Ahmad, Dennehy, Conboy, & Oivo, 2018).

In this mapping, the main benefits and challenges of the method were collected. Dozens of studies pointed out the following as benefits of the method: 1. Improved visibility and transparency; 2. Better control of project activities; 3. Identification of workflow impediments. And as challenges: 1. Lack of good practices and understanding of the method and its implementation; 2. Evaluate performance using metrics; 3. Motivate the team to adopt new practices.

Despite the benefits reported by the research carried out, there are disagreements and disbelief in the inclusion of this new method in the daily management process, as

the involvement of Kanban in the development process is new and there is still a need for a deeper understanding and changes in traditionalism for a faster adoption. (Nevenka & Saso, 2015)

Kanban also helps to identify and make clear which tasks are the highest priority, which allows managers to decide what needs to be done and how to allocate resources properly, as well as improving visibility of work in progress. (Ahmad, Kuvaja, Oivo, & Markkula, 2016) For (Ikonen, Pirinen, Fagerholm, Kettunen, & Abrahamsson, 2011) Kanban's greatest value for the industry lies in its ability to provide real-time process visualization. However, it should be noted that visualization does not guarantee success.

Although the mentioned challenges, Kanban has been successfully applied in several software companies (Seikola, Loisa, & Jagos, 2011), (Rutherford, Shannon, Judson, & Kidd, 2010), (Taipale, 2010)

4. KANBAN IN RTOS AND HIGH-RISK SYSTEMS

Considering that the kanban board is also a Lean tool, and that this is a tool that works universally across industries (Kaur, Sharma, & Matharou, 2013) and, noting that Kanban has shown results in several sectors such as , for example: Avoiding waste in hospitals (Harris, 2018); reduce production time and balance the use of resources in the electronics industry (Lee-Mortimer, 2008); reducing operating costs and losses in small automotive industries (Rahman, Sharif, & Esa, 2013) is very likely to present results in RTOS as well.

The agile manifesto rules the various agile methods proposed after its declaration and, at first, it is natural that methods that value more individuals and interactions than processes and tools, more working software than documentation, more collaboration with the customer than contract negotiation, more responding to changes than following a plan seems to be far from an industry that traditionally works with well-defined processes, tools, plans and documentation and that works with products that are critical to people's lives. (Chenu, 2009)

In fact, some restrictions and demands imposed by regulatory agencies of critical systems and RTOS applied to high-risk systems, such as, for example, standardized documentation and specific security standards conflict with some principles of the agile manifesto. However, the high demands of this industry have made the interest in agile methodologies grow and some adaptations are being proposed to enable the migration of development to an agile approach. (Gibrail & Tim, 2020)

Experience reports have shown that some agile methods have contributed significantly to this niche as well. Scrum and XP Extreme programming methods, for example, have been adopted and well accepted in embedded software industries. (Salo & Abrahamsson, 2008)

In the context of high-risk software, such as aviation software, the requirement: Avoid the loss of human life, resulted in the establishment of the standard: DO-178 issued by the RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics, Inc) in 1982 used by several certification agencies. Although the document contains a series of guidelines that result in the generation of a certain amount of documentation, it is not prescriptive, in other words, it does not impose a specific software development process. (Wils, Baelen, Holvoet, & Vlaminck, 2006) Currently, revision C (DO-178C) is in effect. This review encompasses several other standards such as DO-330 for certification of development tools and DO-333 which deals with formal development methods.

In the Avionic industry, specifically, this regulation increases software development costs but does not avoid the late discovery of problems and the unpredictability of requirements. (Hanssen, Wedzinga, & Stuip, 2017)

The Kanban method has a maturity model called KMM – Kanban Maturity Model that is compatible with CMMI – Capability Maturity Model Integration, Lean/TPS, Real World Risk Institute and Mission Command/Auftragstaktik. It establishes 7 levels (0-6) that allow the organization to understand its maturity in relation to its internal processes and in relation to

stakeholders. The benefits of conquering each one in the levels are summarized below: 0. Oblivious: You can only deliver the products; 1. Emerging: Basic understanding of the workflow, less work overload for employees, more transparency in relation to processes; 2. Defined: Better collaboration, greater customer empathy, basic understanding of demand and capacity, better quality of work delivered. 3. Managed: Shorter lead time, quick balancing of workloads, predictability of deliveries, meeting SLAs (service level agreement) metrics that allow decision making; 4. Quantitatively managed: Risk forecasting, quantitative analyses, full compliance with regulatory agencies, data-driven decisions; 5. Optimizing: Organizational agility, shared reconfiguration of services; 6. Congruent: Resilient to external changes, long-term security. (Anderson & Bozheva, 2021) With this model, it is possible to evolve the adoption of Kanban systematically and formally as a development method and make it clear to regulatory agencies and other external entities how mature the development process is compared to other widely accepted standards like CMMI for example.

5. CONCLUSION AND FUTURE WORKS

The pressure for faster deliveries and better-quality software is also present in the RTOS software market. With the publication of his article, (Wils, Baelen, Holvoet, & Vlaminck, 2006) he took the first step towards a change in the software development paradigm on the road to highly regulated systems that require careful documentation.

Considering the advances in the maturity of the Kanban method and the success of its implementations in the various researched areas, it is noticeable that the method can bring concrete benefits to RTOS industries such as Avionics, Nautical, automobile other critical systems.

For a better acceptance of the method by regulatory actors, other case studies and experience reports would be important and even necessary. Several industries that develop non-regulated and non-vital systems have pioneered new methodologies and experimented with new techniques. It is important that this industry continues to evolve incrementally, and safely as new practices are tested and verified to continue reliable, but at the same time remain competitive and healthy.

References

Ahmad, M. O., Dennehy, D., Conboy, K., & Oivo, M. (2018). Kanban in software engineering: A systematic mapping study. *Journal of Systems and Software*, pp. 96-113. doi:10.1016/j.jss.2017.11.045

Ahmad, M. O., Dennehy, D., Conboy, K., & Oivo, M. (2018, Mar). Kanban in software engineering: A systematic mapping study. *The Journal of Systems and Software [s.l], v. 137*, pp. 96-113. doi:10.1016/j.jss.2017.11.045

Ahmad, M. O., Kuvaja, P., Oivo, M., & Markkula, J. (2016). Transition of Software Maintenance Teams from Scrum to Kanban. *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (pp. 5427-5436). Hawaii: IEEE. doi:10.1109/HICSS.2016.670

Ahmad, M. O., Markkula, J., & Oivo, M. (2013). Kanban in software development A systematic literature review. *2013 39th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications* (pp. 9-16). Santander, Spain: IEEE. doi:10.1109/SEAA.2013.28

Anderson, D. J. (2010). *Kanban: Successful Evolutionary Change for Your Technology Business. [s.l.]:*. Blue Hole Press. doi:9780984521401

Anderson, D. J., & Bozheva, T. (2021). *Kanban Maturity Model, Coaches' Edition: A Map to Organizational Agility, Resilience, and Reinvention.* Kanban University Press. doi:ISBN: 1732821259

Anderson, D. J., & Zheglov, A. (2017). *Fit for Purpose: How Modern Businesses Find, Satisfy, & Keep Customers.* Blue Hole Press. doi:ASIN: B078JFTVS8

Birkeland, J. O. (2010). From a Timebox Tangle to a More Flexible Flow. *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming* (pp. 325-334). Berlin: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-13054-0_35

Burrows, M. (2014). *Kanban from the Inside: Understand the Kanban Method, connect it to what you already know, introduce it with impact.* Blue Hole Press.

Chenu, E. (2009). Agility and lean for avionics. *Lean, Agile Approach to High-Integrity Software Conference.* Paris.

Corona, E., & Pani, F. E. (2013, 01). A Review of Lean-Kanban Approaches in the Software Development. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, pp. 1-13.

Gibrail, I., & Tim, S. (2020, 08 01). A case study of agile software development for safety-Critical systems projects. *Reliability Engineering & System Safety*, p. 106954. doi:10.1016/j.ress.2020.106954

Hammarberg, M., & Joakim, S. (2014). *Kanban in Action.* Manning Publications. doi:ISBN 9781617291050

Hanssen, G., Wedzinga, G., & Stuip, M. (2017). An Assessment of Avionics Software Development Practice: Justifications for an Agile Development Process. *International Conference on Agile Software Development*, (pp. 217-231). Trondheim, Norway. doi:10.1007/978-3-319-57633-6_14

Harris, A. M. (2018, 04). Boosting Efficiency with a kanban plan. *Physician Leadership Journal*, p. 50+. Retrieved from https://link.gale.com/apps/doc/A533408878/AONE?u=googlescholar&sid=bookmark-AONE&xid=2b51f2c7

Ikonen, M., Pirinen, E., Fagerholm, F., Kettunen, P., & Abrahamsson, P. (2011). On the Impact of Kanban on Software Project Work: An Empirical Case Study Investigation. *2011 16th IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems* (pp. 305-314). IEEE. doi:10.1109/ICECCS.2011.37

Kaur, S., Sharma, N., & Matharou, G. (2013, 03 01). Lean manufacturing tool and techniques in process industry. *International Journal of Scientific Research and Reviews*, pp. 54-63.

Lee-Mortimer, A. (2008). A continuing lean journey: an electronic manufacturer's adopting of Kanban. *Assembly Automation*, pp. 103-112. doi:10.1108/01445150810863662

Leon-Garcia, A. (2008). *Probability, Statistics, and Random Processes For Electrical Engineering.* Prentice Hall. doi:ISBN 0131471228, 9780131471221

Murman, E., Walton, M., & Rebentisch, E. (2000). Challenges in the better, faster, cheaper era of aeronautical design, engineering and manufacturing. *The Aeronautical Journal*, pp. 481-489. doi:10.1017/S0001924000091983

Nevenka, K., & Saso, K. (2015, 01). Usage of Kanban Methodology at Software Development Teams. *Journal of applied economics and business*, pp. 25-34.

Nikitina, N., Kajko-Mattsson, M., & Stråle, M. (2012). From scrum to scrumban: A case study of a process transition. *2012 International Conference on Software and System Process (ICSSP)* (pp. 140-149). Zurich, Switzerland: IEEE. doi:10.1109/ICSSP.2012.6225959

Poppendieck, M., & Poppendieck, T. (2003). *Lean Software Development: An Agile Toolkit.* Pearson.

Rahman, N. A., Sharif, S. M., & Esa, M. M. (2013, 01 01). Lean Manufacturing Case Study with Kanban System Implementation. *International Conference on Economics and Business Research 2013*, pp. 174-180. doi:10.1016/S2212-5671(13)00232-3

Rutherford, K., Shannon, P., Judson, C., & Kidd, N. (2010). From Chaos to Kanban, via Scrum. *Agile Processes in Software Engineering and Extreme*

Programming (pp. 344-352). Berlin: Springer.

Salo, O., & Abrahamsson, P. (2008, 03 01). Agile methods in European embedded software development organisations: A survey on the actual use and usefulness of Extreme Programming and Scrum. *Software, IET*, pp. 58 - 64. doi:10.1049/iet-sen:20070038

Seikola, M., Loisa, H.-M., & Jagos, A. (2011). Kanban Implementation in a Telecom Product Maintenance. *2011 37th EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications* (pp. 321-329). Oulu, Finland: IEEE.

Senapathi, M., & Drury-Grogan, M. (2021, 10 05). Systems Thinking Approach to Implementing Kanban: A Case Study. *Journal of Software: Evolution and Process*, p. 33:e2322. doi:10.1002/smr.2322

Simić, D., Svirčević, V., Corchado, E., Calvo-Rolle, J. L., Simić, S. D., & Simić, S. (2021). Modelling material flow using the Milk run and Kanban systems in the automotive industry. Jan;38(1):. *Expert Systems 38*, 1-15 e12546.

Taipale, M. (2010). Huitale – A Story of a Finnish Lean Startup. *Lean Enterprise Software and Systems LESS 2010. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 65* (pp. 111-114). Berlin: Springer.

Wils, A., Baelen, S. V., Holvoet, T., & Vlaminck, K. D. (2006, 06 17). Agility in the avionics software world. *Extreme Programming and Agile Processes in Software Engineering, 7th International Conference, XP 2006. Proceedings. Lecture Notes in Computer Science 4044* (pp. 123-132). Oulu, Finland: Springer. doi:10.1007/11774129_13

ASSESSMENT OF THE IMPACTS OF THE SISCEAB TRANSITION ALTITUDES HARMONIZATION PROJECT (TAHP)

Ricardo Silva de Oliveira[1], José Maria Parente de Oliveira[2], Adilson Cleómenes Rocha[1], Cristian da Silveira Smidt[1], Marília Gusman Thomazi[1]

[1]Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), São José dos Campos/SP – Brasil
[2]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

PAPER ID: SIT183

ABSTRACT

In the late 1950s, the International Civil Aviation Organization (ICAO) established that States (countries) are responsible for defining the Transition Altitude (TA). When crossing this reference, the barometric altimeter must be set to report altitude, when descending, or flight level, when ascending. Initially, the TA was established for each aerodrome, without considering the other aerodromes in the vicinity, however, with the increase in the volume of air traffic, Brazil started to define a single TA for each Terminal Control Area (TMA). However, the constant evolution experienced by the aeronautical industry points to the need of defining a single TA for national aerodromes. This is not a trivial choice. The TA selected should improve current levels of safety, reduce pilots and air traffic controllers workload, and deployment costs should be acceptable. Given this scenario, this work presents the architectures of the four flight information regions of the Brazilian Airspace Control System (SISCEAB), its forty-one Terminal Control Areas (TMA), the TAs used in these terminals, the highest aerodromes, the highest obstacles of the Brazilian territory and the distribution of aeronautical meteorological stations. All the used data was analyzed according to the methodology used by the European Aviation Safety Agency (EASA), in which three possible lines of action are adopted. The first possible line of action is to maintain the current scenario, that is, not to harmonize the TAs. The second option analyzes the impacts of adopting the altitude of 10000 feet for TA harmonization. Finally, in the last scenario, the impacts of adopting an altitude of 18000 feet are studied. The obtained results bring important support for the decision to be made in the TA harmonization project.

Keywords: Transition Altitude Harmonization, Altimeter Setting, Transition Level

1. INTRODUÇÃO

1.1. Altímetro barométrico e Altitude de Transição

O altímetro barométrico é o aviônico que fornece informações de altitude ou nível de voo, conforme ajustado pela tripulação. Sua correta configuração é de fundamental importância para garantir um voo seguro. As informações fornecidas pelo altímetro são utilizadas pela tripulação para o posicionamento adequado da aeronave no espaço aéreo, garantindo a separação vertical com outras aeronaves e com os obstáculos no terreno.

Apesar de sua baixa probabilidade, incidentes relacionados à incorreta configuração do altímetro podem acontecer. Tratam-se de eventos extremamente indesejáveis que colocam em risco vidas e bens. Enquanto esse trabalho estava sendo desenvolvido, ocorreu um grave incidente em Charles de Gaulle - Paris. Ao realizar um procedimento de aproximação em condições de voo por instrumentos, um A-320 da Airhub Airlines chegou a aproximadamente seis pés de altura, colocando em risco as 178 pessoas a bordo. Entre outros fatores, essa ocorrência teve relação com o procedimento de ajuste do altímetro e a carga de trabalho dos pilotos e controladores (Eurocontrol, 2022).

Para fornecer informações de altitude, o altímetro deve ser configurado com a pressão barométrica da estação meteorológica do aeródromo reduzida ao nível médio do mar. Esse procedimento fará com que o altímetro forneça a elevação do aeródromo, quando a aeronave estiver pousada. Esta configuração recebe o nome de ajuste de altímetro ou ajuste QNH (DECEA, 2016).

Após a decolagem, quando estiver cruzando a Altitude de Transição (TA), o altímetro deverá ser ajustado para pressão de 1013.2 hPa. Dessa forma ele fornecerá informação de nível de voo. Esta configuração recebe o nome de ajuste padrão ou ajuste QNE (DECEA, 2016).

Dada a sua importância, nas fases de saída e chegada das aeronaves, neste trabalho serão abordados diferentes cenários de configuração das Altitudes de Transição (TA), bem como o impacto de cada cenário proposto na segurança, na carga de trabalho de pilotos e controladores, sua viabilidade econômica e outros fatores.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Emprego da TA nas Áreas de Controle Terminal (TMA)

Atualmente há quarenta e uma Áreas de Controle Terminal (TMA) na área de Jurisdição do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), sendo três TMA internacionais: Amazônica, Foz do Iguaçu e Passo de Los Libres. Observa-se que as TA já estão harmonizadas por TMA, o que significa que todos os aeródromos em uma TMA operam com uma única TA. Contudo, são empregadas oito diferentes TAs, o que será detalhado a seguir (DECEA, 2021) (DECEA, 2022).

O Brasil está dividido em 5 Regiões de Informação de Voo (FIR), conforme mostra a Figura 1: Amazônica (SBAZ), Recife (SBRE), Brasília (SBBS), Atlântico (SBAO) e Curitiba (SBCW).



Figura 1- Regiões de Informação de Voo.
Fonte: ICEA

Na Figura 2 e na Tabela 1 são apresentadas as onze TMAs da FIR Amazônica e suas respectivas TAs. Na FIR Amazônica são empregadas as TAs de 3000’, 4000’ e 18000’. A TMA SBWA possui a TA mais elevada do SISCEAB. A Altitude Mínima de Setor (MSA) de 3000’ indica que a escolha dessa TA não se deve ao relevo. Esta informação não está disponível na bibliografia consultada.

Possivelmente trata-se de padrão adotado por algum dos países vizinhos, Peru ou Colômbia.

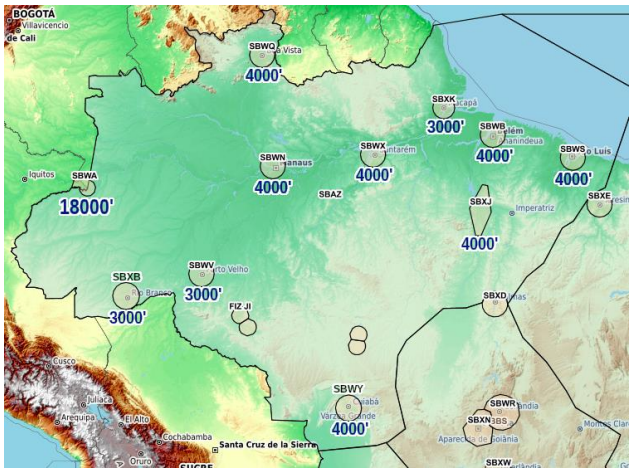


Figura 2 - TMAs e TAs da FIR Amazônica.
Fonte: ICEA

Tabela 1 TMAs e TAs da FIR Amazônica.

TMA	Indicativo	TA em Pés
Amazônica	SBWA	18000
Belém	SBWB	4000
Manaus	SBWN	4000
Boa Vista	SBWQ	4000
São Luís	SBWS	4000
Porto Velho	SBWV	3000
Santarém	SBWX	4000
Cuiabá	SBWY	4000
Rio Branco	SBXB	3000
Marabá	SBXJ	4000
Macapá	SBXK	3000

Na Tabela 2 e na Figura 3 estão apresentadas as dez TMAs da FIR Recife e suas respectivas TAs. Na FIR Recife são empregadas as TAs de 4000', 5000' e 7000'.

Tabela 2 - TMAs e TAs da FIR Recife.

TMA	Indicativo	TA em Pés
Recife	SBWF	4000
Porto Seguro	SBWK	4000
Ilhéus	SBWL	5000
Fortaleza	SBWZ	5000
Aracaju	SBXA	4000
Teresina	SBXE	4000
Maceió	SBXM	4000
Vitória	SBXR	5000
Salvador	SBXS	7000
Natal	SBXT	4000

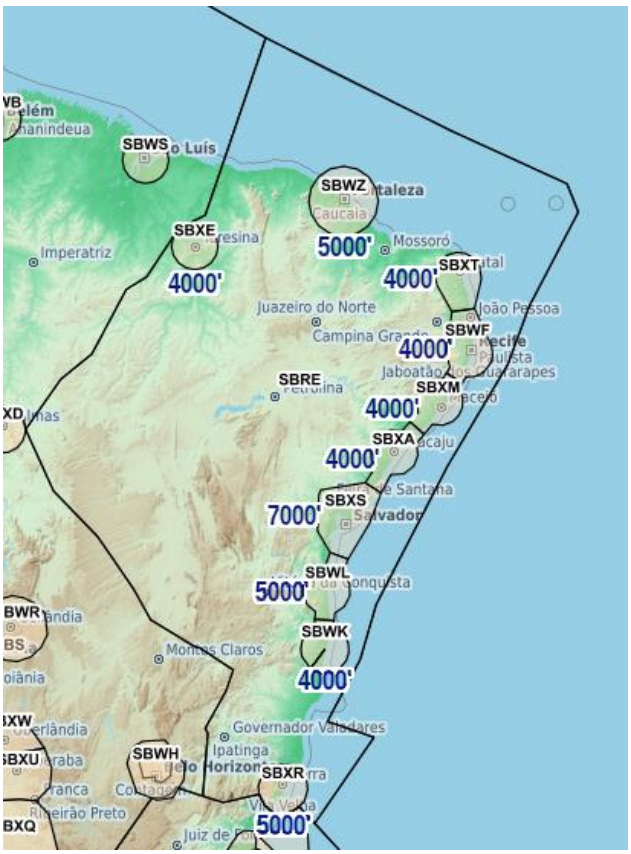


Figura 3 - TMAs e TAs da FIR Recife.
Fonte: ICEA

Na Figura 4 e na Tabela 3 são apresentadas as sete TMAs da FIR Brasília e suas respectivas TAs. Nessa FIR são empregadas as TAs de 5000', 6000', 7000' e 8000'.

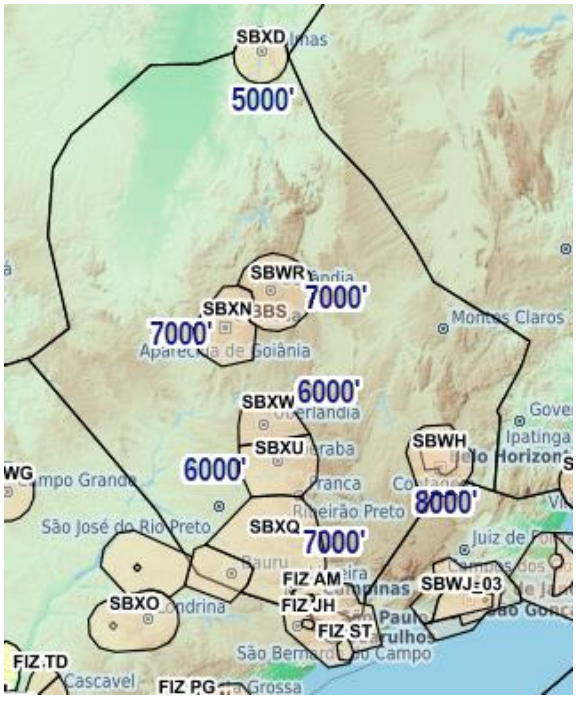


Figura 4 - TMAs e TAs da FIR Brasília.
Fonte: ICEA

Tabela 3 - TMAs e TAs da FIR Brasília.

TMA	Indicativo	TA em Pés
Belo Horizonte	SBWH	8000
Brasília	SBWR	7000
Palmas	SBXD	5000
Anápolis	SBXN	7000
Academia	SBXQ	7000
Uberaba	SBXU	6000
Uberlandia	SBXW	6000

Na Figura 5 e na Tabela 4 são apresentadas as treze TMAs da FIR Curitiba e suas respectivas TAs. Nessa FIR são empregadas as TAs de 3000', 4000', 5000', 6000', 7000', 8000' e 9000'.

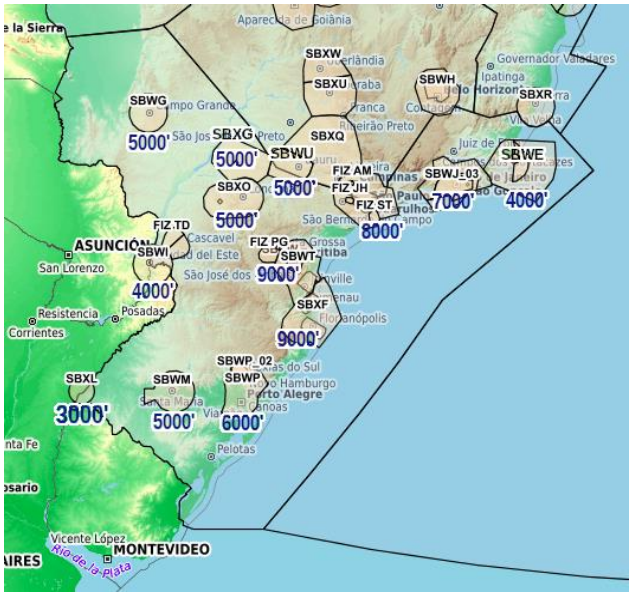


Figura 5 - TMAs e TAs da FIR Curitiba.
Fonte: ICEA

2.2. Fatores a serem considerados no cálculo da TA

No que diz respeito ao estabelecimento das TA, a Seção 2.1.2, do capítulo 2, da parte III, do Doc 8168 estabelece os seguintes princípios elementares (ICAO, 2018):

a) Normalmente, o Estado estabelecerá uma TA para cada aeródromo em sua jurisdição;

b) Quando houver dois ou mais aeródromos próximos, o Estado deverá selecionar a TA mais alta para atender a todos os aeródromos daquela região;

c) Quando possível, deverá ser estabelecida uma TA única para todos os aeródromos daquele estado;

d) A TA deve ser a mais baixa possível, mas normalmente não inferior a 900 m (3 000 pés) de altura acima do aeródromo; e

e) A altura calculada da TA deve ser arredondada para o múltiplo de 1000 pés superior.

Mesmo sendo amplamente utilizadas, essas normas foram estabelecidas no final da década de 1950. Assim, diante do avanço tecnológico vivido pela indústria aeronáutica ao longo do tempo, bem como do aumento constante no volume de tráfego aéreo, isso tudo aponta para a oportunidade de reavaliação dessas normas e sua adequabilidade, levando-se em consideração os cenários atuais e futuros de uso do espaço aéreo.

Tabela 4 - TMAs e TAs da FIR Curitiba.

TMA	Indicativo	TA em Pés
Macaé	SBWE	4000
Campo Grande	SBWG	5000
Rio de Janeiro	SBWJ	7000
Santa Maria	SBWM	5000
Porto Alegre	SBWP	6000
Curitiba	SBWT	9000
Bauru	SBWU	5000
Florianópolis	SBXF	9000
Presidente Prudente	SBXG	5000
Londrina	SBXO	5000
São Paulo	SBXP	8000
Foz do Iguaçu	SBWI	4000
Passo de Los Libres (Uruguaiana)	SBXL	3000

2.3. Aeródromos mais elevados do SISCEAB

O primeiro elemento a ser considerado na determinação da TA é a elevação do aeródromo. Desse modo, na Figura 6 estão plotados os 7 aeródromos registrados com elevação superior a 4 mil pés. O Aeródromo mais elevado do Brasil é SINC, Campo Nuic, localizado na FIR Curitiba, na parte externa, do setor sul, da TMA Florianópolis, com elevação de 4717,8 pés, sendo o único aeródromo da FIR Curitiba acima de 4000 pés. O segundo mais elevado é SSEF, Fazenda Passaredo, localizado na FIR Brasília, na parte interna da TMA Academia, com elevação de 4632,5 pés. Como pode ser observado na Figura 6, ainda na FIR Brasília há outros quatro aeródromos com

elevação superior a 4000 pés. O aeródromo mais elevado da FIR Recife é SNPI, De Piatã, com elevação de 4156,8 pés é o sexto mais elevado do país. Ao concluir-se essa seção, destaca-se que não há registro de aeródromo com elevação igual ou superior a 4000' tanto na FIR Amazônica, quanto na FIR Atlântico.

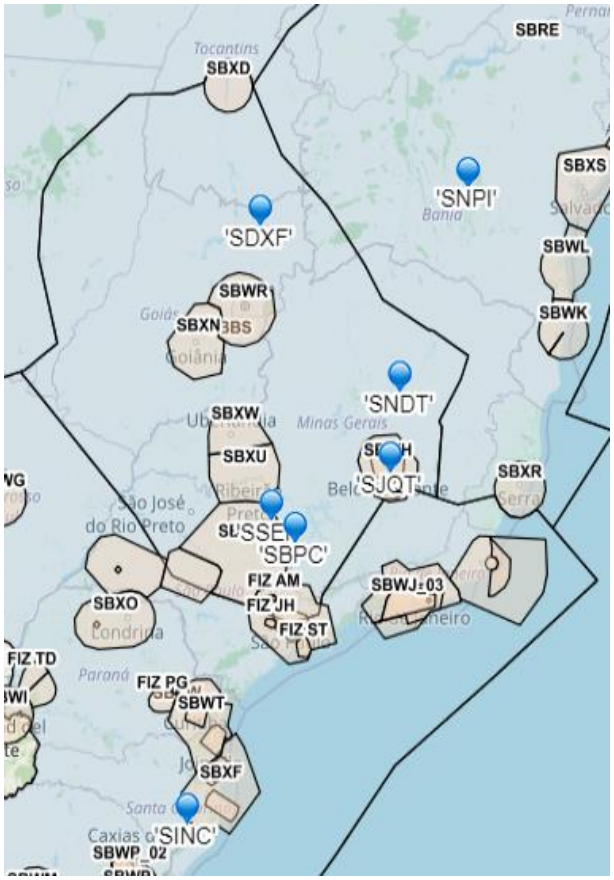


Figura 6 - Aeródromos mais elevados do Brasil. Fonte: ICEA

2.4. Cálculo da TA para o Aeródromo mais elevado do SISCEAB

Desse modo, considerando-se os princípios estabelecidos na legislação, conforme a Seção 3.3 desse texto, e o aeródromo de maior elevação do SISCEAB, Campo Nuic, SINC, conforme a Figura 6, o cálculo da TA mais elevada ficaria da seguinte forma: elevação do aeródromo, acrescida de 3000 pés, sendo esse resultado arredondado para o múltiplo de 1000 superior.

Logo essa TA é obtida pela soma da elevação de SINC + 3000 = 4718' + 3000' = 7718'.

Restando somente arredondar-se o resultado para o múltiplo de mil superior. O que resulta em 8000 pés.

Portanto, uma análise inicial indica que 8000 pés é a menor altitude que pode ser adotada como candidata a TA para todo o território brasileiro. Essa é uma análise preliminar que leva em consideração a elevação do aeródromo e os princípios estabelecidos pela ICAO na década de 1950, sendo ainda necessário analisar outros fatores que possam implicar na escolha de uma TA mais elevada.

2.5. Pontos mais elevados do SISCEAB

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é identificar os eventuais óbices para a adoção, no espaço aéreo brasileiro, de valor único ou de um número reduzido de valores unificados para Altitude de Transição (TA), faz-se necessário identificar os obstáculos mais elevados e os possíveis impactos na segurança da navegação aérea.

Na Figura 7, estão plotadas as localizações do Pico da Neblina, com 9872 pés, e o Pico 31 de Março, com 9757 pés, que são os dois pontos mais elevados do território brasileiro, localizados no Estado do Amazonas, na fronteira com a Venezuela (IBGE, 2016). Conforme (DECEA, 2021), páginas 210 e 211, os movimentos aéreos que cruzam a Serra do Imeri são predominantemente voos internacionais com destino aos Estados Unidos da América, tratando-se, portanto, de aeronaves que se utilizam do espaço aéreo superior. De modo que a região dos Picos da neblina e 31 de Março não possuem volume significativo de tráfego aéreo no espaço aéreo inferior.

Ainda na Figura 7, está representado o Monte Roraima, com 8970 pés, sendo o 8° ponto mais elevado do Brasil, no Estado de Roraima, na fronteira entre Brasil, Guiana Inglesa e Venezuela. Uma vez que os movimentos aéreos nessa região têm as mesmas características que o tráfego na região da Serra do Imeri, o Monte Roraima também não representa risco para a segurança da navegação aérea na FIR Amazônica.

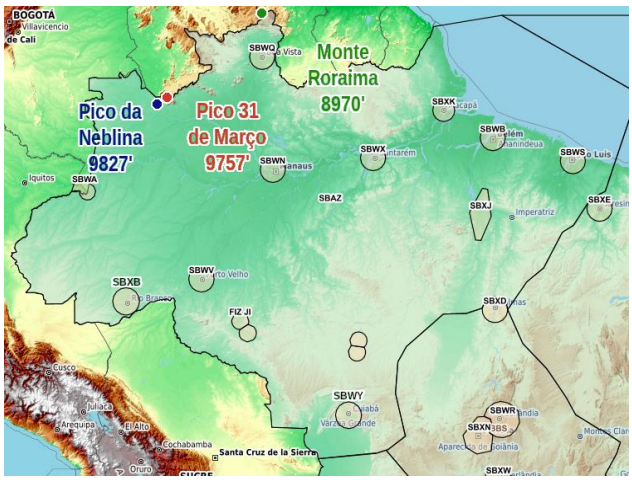


Figura 7 - Pontos elevados da FIR Amazônica
Fonte: ICEA

Na parte sul da FIR Recife, na Região da Serra do Caparaó, está o Pico da Bandeira, com elevação de 9486', 3° ponto mais elevado do SISCEAB. Também estão localizados na mesma Serra, o Pico do Calçado e o Pico do Cristal. Essas elevações estão localizadas entre as TMA Belo Horizonte e Vitória, 4º e 16º mais movimentadas do Brasil, respectivamente. Portanto trata-se de uma região com um determinado número de voos regionais, sendo também ponto de passagem entre a Região Nordeste e Sudeste do País, apresentando elevado crescimento do número de movimentos nos períodos de férias, exigindo, assim, planejamento para os aeronavegantes que utilizam o espaço aéreo inferior.

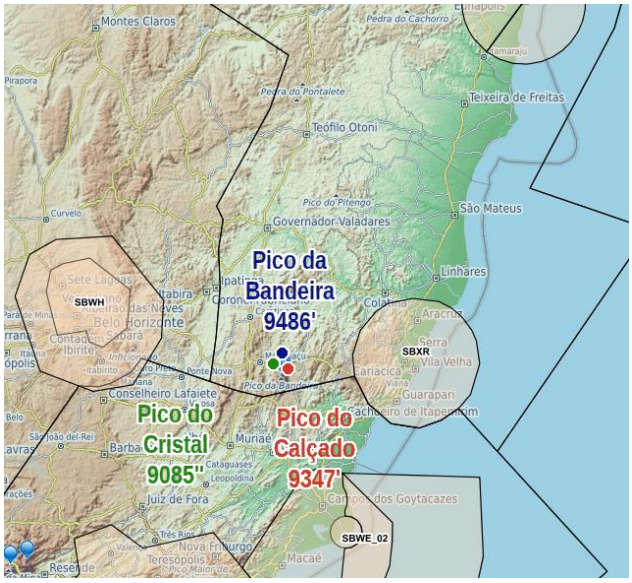


Figura 8 - Pontos elevados da FIR Recife
Fonte: ICEA

Entre as TMA São Paulo e Rio de Janeiro, as duas TMA mais movimentadas do Brasil, chegando juntas a ultrapassar meio milhão de movimentos ao ano, encontra-se a Serra da Mantiqueira. Trata-se de uma cadeia montanhosa com mais de 500 quilômetros de extensão que se estende pelos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Nesta Serra, estão localizados o Pico da Pedra da Mina, com 9180', e o Pico das Agulhas Negras, com 9157', são a 5ª e a 6ª maiores elevações do Brasil, respectivamente.

Trata-se de um dos espaços aéreos mais movimentados do Brasil. Todo tipo de aviação faz uso desse Espaço Aéreo: Aviação Militar, Aviação Regular, Aviação Geral, Paraquedistas e Voos Experimentais.

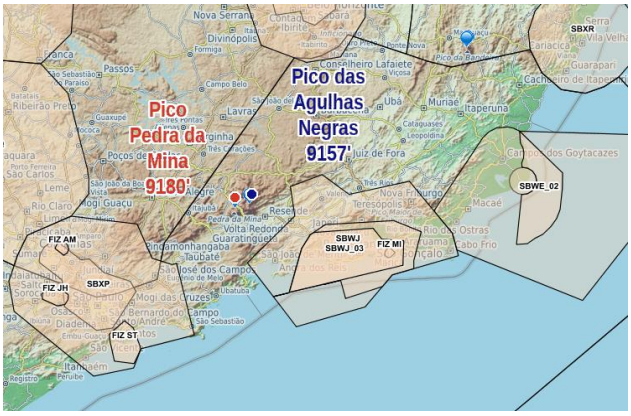


Figura 9 - Pontos elevados da FIR Curitiba
Fonte: ICEA

Apesar de não estarem representados na Figura 9, o 9º e o 10º pontos mais elevados do Brasil, Morro do Couto e Pedra do Sino de Itatiaia, também fazem parte do complexo da Mantiqueira.

Os elementos geográficos apresentados nesta seção apontam que o Brasil possui diversas formações com elevações superiores a 9000 pés. Apontando, portanto, para a conveniência da adoção de uma TA de 10 mil pés ou superior.

A adoção de uma TA unificada de 10 mil pés permitiria que os aeronavegantes cruzassem essa altitude utilizando o ajuste QNH. Nessa situação, uma vez que a navegação vertical está baseada em altitude de voo e não mais em nível, a tripulação teria real consciência da separação com as elevações do terreno.

2.6. Distribuição das Estações de Meteorologia Aeronáutica

Na Seção 5, da Instrução do Comando da Aeronáutica 100-37, (DECEA, 2020), observa-se que a pressão para ajuste de altímetro QNH será informada às aeronaves na autorização para táxi antes da decolagem, ou será informada às aeronaves que chegam, tão logo sejam estabelecidas as comunicações. Essas informações devem ser prestadas pelos Serviços de Controle de Tráfego Aéreo ou pelos Serviços de Informação de Voo, conforme disponível na localidade. Assim, nesta seção será analisada a disponibilidade de estações meteorológicas no SISCEAB.

Sobre esse assunto, o Brasil dispõe de 149 estações meteorológicas distribuídas pelo território nacional, cujas coordenadas geográficas podem ser consultadas no site www.aisweb.decea.mil.br (DECEA, 2022).

Na Figura 10, em azul, estão representadas as estações disponíveis na FIR Amazônica. Além das estações disponíveis nas TMA, vários aeródromos da região dispõem de estações para observação meteorológica. Essas estações coletam diversas informações meteorológicas, necessárias ao voo seguro, tais como, velocidade e direção do vento, visibilidade, cobertura de nuvens, temperaturas, pressão para ajuste do altímetro, dentre outras informações necessárias.

As informações coletadas pelas estações ficam disponíveis para os aeronavegantes através do portal www.redemet.aer.mil.br , das Centrais Telefônicas dos Serviços de Informações Aeronáuticas, e das Salas dos Serviços de Informações Aeronáuticas dos aeroportos, conhecidas como salas AIS. Essas informações também podem ser recebidas a bordo das aeronaves, por meio de mensagem de voz, quando o piloto solicita aos serviços de tráfego aéreo ou por meio de serviços automatizados como o Serviço Automático de Informação de Terminal ou por enlace de dados, ATIS ou D-ATIS.

Além disso, esse importante conjunto de informações é enviado e armazenado nos bancos de dados climatológicos instalados no ICEA, tendo em vista a realização de trabalhos de pesquisa para aumentar a eficiência do uso do espaço aéreo brasileiro.

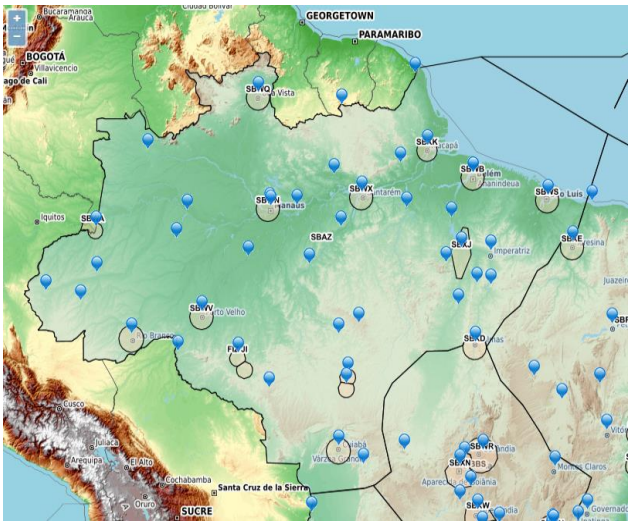


Figura 10 - Estações meteorológicas FIR SBAZ
Fonte: ICEA

Assim como na Região Norte, a FIR Recife dispõe de uma ampla rede de estações meteorológicas distribuídas na região de informação de voo, conforme pode ser observado na Figura 11.

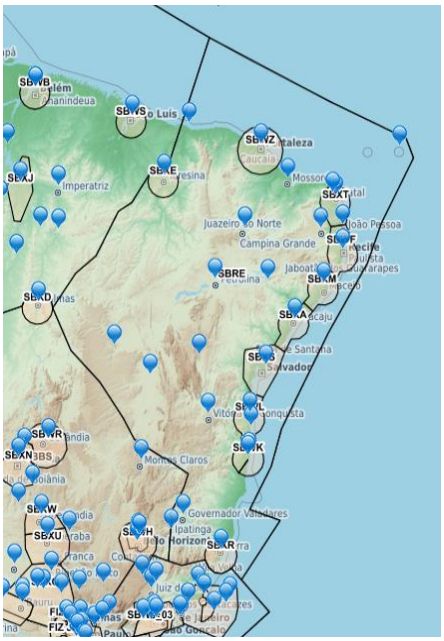


Figura 11- Estações meteorológicas FIR SBRE
Fonte: ICEA

Diferentemente das regiões norte e nordeste, as estações meteorológicas da FIR Brasília não estão distribuídas de forma homogênea. Observa-se na Figura 12 que o setor norte da FIR conta somente com a estação localizada na TMA Palmas.

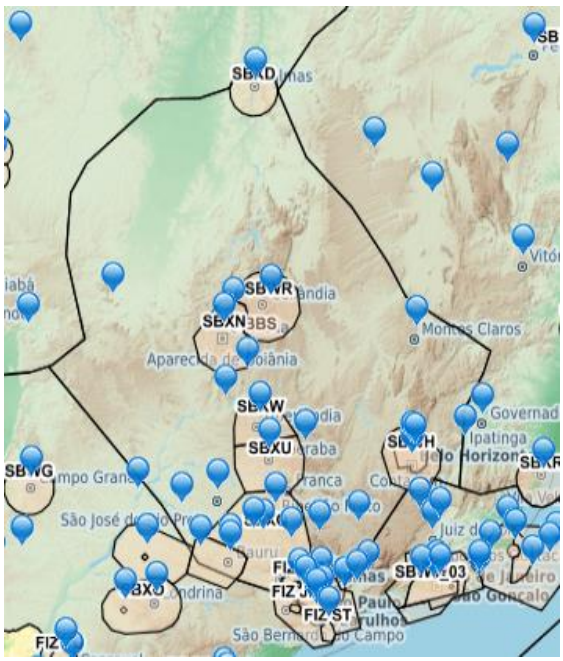


Figura 12 - Estações meteorológicas FIR SBBS
Fonte: ICEA

Nas regiões sudeste e sul, área da FIR Curitiba, observa-se uma ampla rede de estações meteorológicas, conforme a Figura 13. Uma vez que nessa região estão os espaços aéreos mais utilizados do SISCEAB, isso explica o maior número de estações meteorológicas disponíveis.



Figura 13 - Estações meteorológicas FIR SBCW
Fonte: ICEA

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) trabalha ininterruptamente para garantir que o Brasil disponha de um dos espaços aéreos mais seguros do mundo, sendo reconhecido como referência global em segurança, fluidez e eficiência no gerenciamento e controle integrado do espaço aéreo (DECEA, 2021).

Essa posição de vanguarda exige um processo de evolução permanente de todos os serviços prestados. Tal evolução materializa-se por meio do Programa SIRIUS e das dezenas de projetos nas seguintes áreas: Segurança; Gerenciamento de Tráfego Aéreo; Operações militares; Comunicação, Navegação e Vigilância; Meteorologia Aeronáutica; Gerenciamento da Informação; Busca e Salvamento; Recursos Humanos; Qualidade, Desempenho e Cooperação Internacional e Pesquisa Científica para Inovação Tecnológica (DECEA, 2022).

As análises e conclusões que serão apresentados a seguir fazem parte desse esforço realizado pelo DECEA no intuito de aperfeiçoar os serviços prestados aos usuários do Espaço Aéreo Brasileiro.

Seguindo a metodologia adotada pelo Eurocontrol (EASA, 2012) serão comparadas três abordagens:

- Opção 1 - Manter o cenário atual sem realizar qualquer modificação nas TA empregadas no SISCEAB;
- Opção 2 - Implementar a harmonização da TA de 10000 pés para todas as TMA do SISCEAB; ou
- Opção 3 - Implementar a harmonização da TA de 18000 pés para todas as TMA do SISCEAB.

Em cada um dos três cenários considerados serão estudados os impactos nas seguintes áreas: a) Impactos na Segurança Operacional, b) Impactos para os Provedores de Serviços de Navegação Aérea (ANSP), c) Impacto na carga de trabalho dos ATCO, d) Impacto para os aeronavegantes, e) Impactos relacionados à economia ou eficiência das operações, e f) Impactos relacionados ao meio ambiente.

3.1. Opção 1 - Manutenção do cenário atual

3.1.1. Impactos na Segurança Operacional

Caso fosse mantida a configuração atual de TA, não haveria alterações nos níveis de

Segurança Operacional. Assim potenciais riscos devido a falta de padronização permaneceriam. Um exemplo dos óbices trazidos pela falta de padronização pode ser exemplificado com o auxílio da Figura 14. Uma aeronave voando no nível 060 no interior da TMA Aracaju (SBXA) estaria utilizando configuração QNE, enquanto uma outra aeronave a 5500 pés na TMA Salvador (SBXS) estaria utilizando configuração QNH. Duas aeronaves em espaços aéreos adjacentes utilizando referências altimétricas diferentes implica em maior carga de trabalho para os ATCO responsáveis por essas porções do espaço aéreo. TA harmonizadas em TMAs adjacentes significam menor carga de trabalho para os ATCOs, viabilizando um uso mais eficiente e seguro do espaço aéreo.



Figura 14 - TMA Aracaju (SBXA) e TMA Salvador (SBXS) - Fonte ICEA

3.1.2. Impacto para os Provedores de Serviços de Navegação Aérea (PSNA)

Não haveria necessidade de mudanças no planejamento atual de recursos, orçamentos, e arquitetura do espaço aéreo (EASA, 2012).

3.1.3. Impacto na carga de trabalho dos ATCO

Os estudos realizados por (EASA, 2012) apontam que não haveria necessidade de treinamento adicional para os ATCO, entretanto os impactos esperados com o aumento da demanda, poderiam ser diminuídos com um espaço aéreo padronizado.

3.1.4. Impacto para os aeronavegantes;

Não haveria impacto para os aeronavegantes, entretanto (Frei, 2016) aponta que atualmente o ajuste do altímetro ocorre na fase de maior carga de trabalho da tripulação. Isso se deve, em parte, a falta de atualização nas orientações emitidas pela ICAO sobre o assunto. Com a evolução ocorrida ao longo do tempo na performance das aeronaves e a modernização dos procedimentos de chegada e saída, resulta que entre 2000 e 6000 pés são as fases de maior carga de trabalho dos pilotos (Figura 15), exatamente a região recomendada pela ICAO, pois a norma diz que deve ser a menor altitude possível acima de 3000 pés.

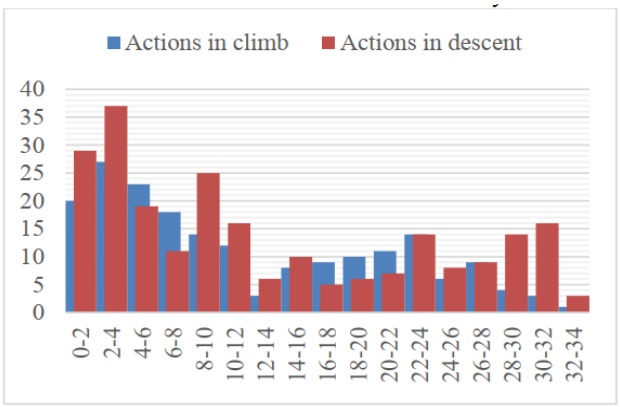


Figura 15 - Atividades de cabine - (Frei, 2016)

3.1.5. Impactos relacionados à economia ou eficiência das operações

Não haveria custos adicionais, tão pouco redução na quantidade de níveis de voo disponíveis para utilização. (EASA, 2012)

3.1.6. Impactos ambientais

Uma vez que as configurações atuais de TA colocam o procedimento de ajuste de altímetro em etapas de elevada carga de trabalho da tripulação, tais configurações podem não estar adequadas ao uso aprimorado de Operações de Descida Contínua (CDOs), bem como procedimentos de partidas de alta eficiência (CCOs).

3.2. Opção 2 - Implementar a harmonização da TA de 10000 pés para todas as TMA do SISCEAB

3.2.1. Impactos na Segurança Operacional

A harmonização aumentaria os níveis de consciência situacional, bem como reduziria a

carga de trabalho da tripulação em fases críticas do voo.

3.2.2. Impacto para os Provedores de Serviços de Navegação Aérea (ANSP)

A harmonização resultaria em ambiente operacional ATM mais previsível e simplificado. Entretanto haveria custos decorrentes da necessidade de simulação e validação em ambiente simulado dos novos procedimentos adotados (EASA, 2012).

3.2.3. Impacto na carga de trabalho dos ATCO

Atualmente os aeronavegantes dispõem de diversas fontes automatizadas para obtenção do QNH, conforme explicado na Seção 2.6, mesmo assim haveria uma pequena redução na carga de trabalho dos ATCO.

3.2.4. Impacto para os aeronavegantes

Um ambiente ATM mais simplificado reduziria a carga de trabalho da tripulação, permitindo que as configurações de altímetro sejam realizadas em etapas mais adequadas do voo. Atualmente o ambiente é heterogêneo e a tripulação precisa conferir qual é a TA sempre que voa para uma nova localidade.

3.2.5. Impactos relacionados à economia ou eficiência das operações

Embora os dados relacionados a custos e benefícios não estejam disponíveis para avaliação, é evidente que haverá custos de harmonização. Entretanto, espera-se uma melhora pouco perceptível nas operações aéreas. (EASA, 2012)

3.2.6. Impactos ambientais

No caso do SISCEAB seria necessário atualizar todas as Cartas de Saída por Instrumento (SID), Cartas de Chegada (STAR) e Cartas de Aproximação por Instrumento (IAC) publicadas no Brasil. No total, são 729 SID (publicados em 542 cartas, atendendo a 141 aeródromos), 283 STAR (publicados em 164 cartas, atendendo a 36 aeródromos) e 707 IAP (publicados em 653 cartas, atendendo a 146 aeródromos) em vigor no ciclo AIRAC de 19 de maio de 2022. A sua alteração poderia ser feita durante a revisão periódica dos procedimentos, que deve ser efetuada a cada cinco anos (DECEA, 2022) (ICAO, 2018).

3.3. Opção 3 - Implementar a harmonização da TA de 18000 pés para todas as TMA do SISCEAB

3.3.1. Impactos na Segurança Operacional

A Harmonização indica aumento da consciência situacional e redução da carga de trabalho da tripulação em fases críticas do voo, exatamente como na opção 2. Entretanto, essa opção desloca o procedimento de ajuste do altímetro para a região sob o controle do Centro de Controle de Área (ACC). Apesar de exigir mais treinamento, foi a opção adotada com sucesso pela FAA.

3.3.2. Impacto para os Provedores de Serviços de Navegação Aérea (ANSP)

A médio prazo, o processo de harmonização resultaria em um ambiente operacional ATM mais simplificado, como ocorre na opção 2.

3.3.3. Impacto na carga de trabalho dos ATCO

Atualmente os aeronavegantes dispõem de diversas fontes automatizadas para obtenção do QNH, conforme explicado na Seção 2.6, mesmo assim haveria uma pequena redução na carga de trabalho dos ATCO. Entretanto, a elevação da TA para 18000 pés pode deslocar alguma atividade do ATCO que atua em TMA, para o ATCO que atua no ACC.

3.3.4. Impacto para os aeronavegantes

Um ambiente ATM mais simplificado reduziria a carga de trabalho da tripulação, permitindo que as configurações de altímetro sejam realizadas em etapas mais adequadas do voo. Entretanto, a elevação da TA para 18000 pés exigiria treinamento adicional para os aeronavegantes, uma vez que o procedimento de ajuste do altímetro sairia do espaço aéreo inferior, área da TMA, onde os aeronavegantes brasileiros estão habituados com a realização desse procedimento, para espaço aéreo superior, área do ACC.

3.3.5. Impactos relacionados a economia ou eficiência das operações

Embora os dados relacionados a custos e benefícios não estejam disponíveis para avaliação, é evidente que haverá custos de harmonização. Entretanto, espera-se uma melhora mesmo que pouco perceptível nas operações aéreas.

3.3.6. Impactos ambientais.

Exatamente como no item 3.2.6

3.4. Harmonização da TA nas FIR do SISCEAB

Durante a elaboração deste relatório, concluiu-se que não há estações meteorológicas suficientes, ao longo do território brasileiro, para harmonização ampla, ficando o escopo desse estudo limitado ao processo de Harmonização das Altitudes de Transição do SISCEAB das quarenta e uma TMAs em operação no país.

4. CONCLUSÕES

Segundo (EASA, 2012) durante as atividades do Grupo de Trabalho para Implementação da Altitude de Transição Harmonizada da Europa (HETA TF), os especialistas indicaram a altitude de 18000 pés como a melhor opção a ser empregada na região de responsabilidade do Eurocontrol.

Ao longo dos trabalhos da força tarefa, constatou-se que a altitude de 10000 pés se mostrou mais adequada para definição de uma TA única para o continente Europeu. Apesar de alguns países já terem implantado a TA de 10000 pés com sucesso, (EASA, 2012) mostra que o processo na Europa ainda levará muitos anos para ser concluído.

Não é possível, no escopo deste relatório definir qual das opções é mais adequada para o SISCEAB. Entretanto, observa-se que a opção 2 traz as seguintes vantagens:

1- Melhora os níveis de segurança operacional em algumas regiões do Brasil, conforme mostrado na Seção 3.1.1;

2- Reduz a carga de trabalho da tripulação nos momentos críticos do voo, conforme Seção 3.1.4;

3- Harmonizaria a TA acima de qualquer obstáculo existente no território nacional, contribuindo assim para um aumento na segurança operacional; e

4- A opção 2 traria poucos impactos para as operações ATM do SISCEAB, uma vez que já há TA de 9000 pés implantada no SISCEAB.

5. CONTINUAÇÃO DOS TRABALHOS

Os dados apresentados neste trabalho servem de subsídio para o relatório que seria enviado do ICEA para o Subdepartamento de Operações (SDOP) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) para análise e deliberação, de modo que haveria dois caminhos possíveis. Adotar a opção 1, e manter a configuração atual das TAs do SISCEAB, ou a criação de grupo de trabalho (GT) multidisciplinar com o objetivo de elaborar o Projeto de Harmonização das Altitudes de Transição do SISCEAB (HATS). Esse GT poderia ser composto por representantes do Subdepartamento de Operações do DECEA (SDOP), Instituto de Controle do Espaço (ICEA), Instituto de Cartografia Aeronáutica (ICA), Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), Seção de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM) dos cinco Regionais (CINDACTAs e CRCEA-SE) do SISCEAB e representantes das companhias aéreas e pilotos.

Por fim, os autores agradecem aos militares do efetivo do ICEA: Capitão Mário e Sargentos Nelson, Sillas, Tábada e Mentzingen, pela dedicação e empenho na coleta dos dados que foram utilizados na elaboração deste trabalho.

Referências

DECEA. (16 de janeiro de 2016). Instrução do Comando da Aeronáutica que estabelece o emprego da “Correção QNE” (ICA 100-02). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

DECEA. (19 de novembro de 2020). Instrução do Comando da Aeronáutica Serviços de Tráfego Aéreo (ICA 100-37). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

DECEA. (30 de março de 2021). Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2021. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

DECEA. (05 de junho de 2022). *AISWEB*. Fonte: Pesquisa por código indicador: https://aisweb.decea.mil.br/

DECEA. (14 de junho de 2022). Programa SIRIUS - Realizações 2021. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

DECEA. (05 de junho de 2022). *REDEMET*. Fonte: REDEMT Aeródromos: https://redemet.aer.mil.br/

EASA. (2012). *A-NPA 2012-01: Harmonised Transition Altitude.* Cologne: EASA.

Eurocontrol. (12 de julho de 2022). *A320, vicinity Paris CDG France, 2022*. Fonte: skybrary: https://skybrary.aero/accidents-and-incidents/a320-vicinity-paris-cdg-france-2022

Frei, J. (30 de julho de 2016). Implementation of Harmonised European Transition. *Magazine of Aviation Devvelopment*, pp. 5-13.

IBGE. (29 de fevereiro de 2016). *Geociências: IBGE revê as altitudes de sete pontos culminantes*. Fonte: Agência IBGE: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/15275-geociencias-ibge-reve-as-altitudes-de-sete-pontos-culminantes

ICAO. (30 de junho de 2018). DOC 8168 PANS-OPS/611: Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations. Quebec, Montréal, Canadá.

SUSTENTABILIDADE AEROPORTUÁRIA E OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – UMA ABORDAGEM BIBLIOMÉTRICA E MAPEAMENTO GRÁFICO

Nathane Ana Rosa Negri[1]*, Viviane Adriano Falcão[2], Hélio da Silva Queiroz Júnior[2]
Instituto Tecnológico de Aeronáutica[1], Universidade Federal de Pernambuco[2]

*** Corresponding author e-mail address**: nathanenegri@gmail.com

PAPER ID: SIT150

ABSTRACT

Themes focused on sustainability issues are increasingly present in industries, governments and incorporations. The 2030 Agenda for Sustainable Development and its Sustainable Development Goals (SDGs) represent a global correlation with the dimensions of sustainability, and themes are explored in the literature. Regarding airport sustainability, studies seek to analyze how the airport complex can be considered sustainable, either due to infrastructure and air operations, and even economic sustainability. Thus, this article seeks to identify lessons from the sustainability assessment of the air system. To this end, a bibliometric analysis and graphic mapping were implemented through the CiteSpace visualization of 102 articles, between 2001 and 2020. Data search covers research from the Scopus and Web of Science databases. The results suggest, in addition to indicating a gap in the literature of the SDDs associated with air transport, gaps related to airport sustainability, and there are not many countries that absorb this theme of study, as well as a limitation of authors.

Keywords: Airports, Sustainability, SDGs, UN, Bibliometry.

.

1. INTRODUÇÃO

O tema da sustentabilidade está cada vez mais presente nas agendas governamentais, nas indústrias, nas incorporações, nas universidades e também, em sistemas que envolvem a economia de uma nação. De acordo com Borin de Oliveira Claro, Pimentel Claro e Amâncio (2008), o conceito de sustentabilidade mais difundido é o da Comissão Brundtland, de 1987, que se baseia em questões de visão em longo prazo. Em que o desenvolvimento sustentável deve satisfazer às necessidades da geração presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras.

O conceito de diversidade ao longo dos anos sofreu algumas modificações, surgindo novas definições. Porém, as dimensões sempre são os pontos em comum dos conceitos (Borin de Oliveira Claro, Pimentel Claro e Amâncio, 2008). A Organização das Nações Unidas (2020) estabelece que as dimensões da sustentabilidade, conhecidas por tripple bottom line, compõem e se relacionam com aspectos econômicos, ambientais e sociais. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) representa uma correlação mundial com as dimensões da sustentabilidade. Muitos estudos avaliam os ODS, mas poucos correlacionam com os sistemas de transportes.

Macmillan et al. (2020) aplicaram um estudo de caso em Auckland, Nova Zelândia, e apontam que tornar os bairros urbanos mais seguros e atrativos ao transporte ativo pode contribuir para várias metas dos ODS. Porém, o resultado desse objetivo requer parcerias entre pesquisadores, profissionais de saúde pública, políticas públicas e um alto nível de planejamento.

No contexto do transporte aéreo, apenas uma publicação foi identificada, o que mostra uma lacuna de pesquisa entre os ODS e o modo aéreo. Di Vaio e Varriale (2020) averiguaram, dentre sete aeroportos da Itália analisados, que estes não vêm incorporando em suas agendas os 17 ODS.

Em 2018, 4,3 bilhões de passageiros foram transportados pelas companhias aéreas em todo o mundo, o que representou um aumento de 6,4% da demanda em relação a 2017. Ademais, as projeções indicavam que o volume de tráfego aéreo, até 2039, mais que dobraria. Contribuindo positivamente em termos econômicos e sociais, além de desenvolver países e regiões (Industry High LevelGroup, 2019).

Com o desenvolvimento dos transportes aéreos, muito se tem discutido sobre sustentabilidade. De acordo com o Industry High LevelGroup (2019), o implemento dos ODS depende de avanços no transporte aéreo sustentável e na mobilidade, que é uma chave do desenvolvimento sustentável. Acessibilidade é outro ponto necessário, já que 74,4% de 7,5 bilhões de pessoas no mundo têm acesso a um aeroporto internacional em um raio de 100 quilômetros. Ainda, o estudo expõe que os objetivos 8, 9, 11 e 13 são os que estão mais relacionados ao transporte aéreo sustentável, sendo, respectivamente, (i) Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todas e todos; (ii) Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação; (iii) Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis e; (iv) Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.

Ainda a respeito da sustentabilidade aeroportuária, muitos temas vêm sendo enumerados, principalmente no tocante à futura indústria aeronáutica, e suas tendências. Os temas abordam desde sustentabilidade operacional à sustentabilidade ambiental, e com o advento da pandemia, pode-se acrescentar a importância de estudar a sustentabilidade sanitária.

Se tratando da sustentabilidade operacional, empresas passaram a estudar pontos que abordem uma maior flexibilidade nas operações aéreas. Exemplos esses como a automação na aviação, de outro modo, aeronaves com operações de sistemas autônomos, que geram plataformas mais versáteis e comunicações resilientes. Outro tópico está em relação a tipos de combustíveis alternativos a serem empregados e propulsões elétricas, fatores que colaboram não somente

com a eficácia da operação, mas também ao meio ambiente. Ciência dos dados, inteligência artificial e operação smart fleet são outros assuntos em pauta.

A sustentabilidade ambiental está diretamente ligada ao uso de materiais mais sustentáveis. Atualmente, as baterias dos sistemas das aeronaves são pesadas e não apropriadas para um descarte saudável ao meio ambiente. Nesta linha, há pesquisas interligadas a opções de substituição nas arquiteturas elétricas, como baterias híbridas e uma readequação da gestão de resíduos, buscando um resultado de um futuro histórico sustentável com o descarte dos materiais que compõem uma aeronave. Assim como o descarte adequado das carcaças das aeronaves, tal como, nos Estados Unidos, em que existem grandes cemitérios de aviões no meio do deserto do Arizona.

Além da sustentabilidade operacional e ambiental, ainda há projetos e estudos que analisam a sustentabilidade em termos de conforto ao passageiro, isto é, uma conectividade rápida e mais confiável. A confiabilidade relaciona-se na utilização de materiais que permitam um ambiente livre de vírus e bactérias, como uso de materiais nanotécnicos, que contribuem à qualidade do ar na cabine, trazendo um ambiente saudável e de conforto.

Desta forma, fica explicito a busca da eficiência do sistema aéreo como um todo. Estudos significativos que abordam a respeito de sustentabilidade aeroportuária foram encontrados na literatura, mas nenhum a partir de análises bibliométricas. Assim, neste artigo pretende-se avaliar os temas e evoluções da sustentabilidade aeroportuária, atrelada com os ODS e possíveis interferências de sustentabilidade do setor em relação às pandemias. A principal motivação para realizar esta análise bibliométrica é entender as ligações da sustentabilidade com o transporte aéreo e se os artigos contemplam os objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 das Nações Unidas.

Portanto, o propósito do estudo é averiguar quais são as visões globais, de modo sistemático, que a literatura vem abordando no âmbito de sustentabilidade aeroportuária, quais são os países que vem pesquisando a respeito, assim como quais os journals e palavras chaves mais utilizados. Além de verificar se os artigos que dissertam sobre sustentabilidade aeroportuária realizam a ligação com os objetivos de desenvolvimento sustentável da agenda de 2030.

Como objetivo, o artigo busca responder à seguinte questão de pesquisa: O que se pode aprender a respeito do transporte aéreo sustentável por meio de uma revisão bibliométrica? Outras questões são também propostas: (a)Há na literatura estudos que correlacionemos objetivos do desenvolvimento sustentável com o transporte aéreo? (b) Com base em evidências bibliométricas, quais são os journals, países e autores que têm estudado a sustentabilidade do transporte aéreo? (c) Há interferências na sustentabilidade aeroportuária advindas de situações em períodos de pandemia?

Para responder a essas perguntas, uma vasta literatura é analisada cobrindo o período de 2001-2020. Para tal, este estudo implanta uma análise bibliométrica, por meio do software de visualização CiteSpace e de mapeamento gráfico de 102 artigos selecionados. A busca de dados abrange pesquisas nos websites da Scopus e Web of Science.The introduction must start in the beginning of page 2. In the introduction, the authors must present the subject and the main objectives of the study in a summarized way, covering aspects such as the objectives, the justification and/or the motivation of the study and the definition of the problem. The complete article is expected to have 10 pages at maximum.

2. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O ano de 2015 constou por algumas pautas nas Nações Unidas. Governos dos países e a sociedade civil se reuniram com o objetivo de decidir sobre novos caminhos em termos de melhorar a qualidade de vida da população mundial, acabar com a pobreza, promover a prosperidade e o bem-estar para todos, proteger o meio ambiente e enfrentar as mudanças climáticas. As ações decorridas

resultaram nos novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), nos quais se basearam nos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) (Nações Unidas Brasil, 2020).

De acordo com as Nações Unidas Brasil (2020), a nova agenda universal de desenvolvimento sustentável, denominada de agenda 2030, apresenta 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e 169 metas. Os objetivos são integrados e indivisíveis, responsáveis pelo equilíbrio das três dimensões do desenvolvimento sustentável, a saber: (i) econômica; (ii) social e; (iii) ambiental.

Uma diversidade de estudos foi identificada na literatura a respeito dos ODS, os temas são variados e buscam, em sua maior parte, discutir os gargalos, dificuldades e possíveis contribuições reais provindas dos objetivos sustentáveis.

Shulla et al. (2020) analisaram a correlação de uma disciplina, conhecida por ciência cidadã, com os ODS. Vale mencionar que ciência cidadã é conhecida como a participação de indivíduos e grupos nos processos científicos. Um dos resultados apontados indica que a interação de disciplinas, como a mencionada, e os ODS, pode aumentar o reconhecimento da disciplina como uma fonte valiosa de contribuição para as sociedades sustentáveis. Bem como, pode direcionar os cidadãos e as organizações a desenvolverem uma melhor consciência do valor da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.

Parikh et al. (2020) associaram a agenda 2030 com situações esporádicas, como por exemplo, acontecimentos que envolvem pandemias. Os impactos do COVID-19 expuseram, ainda mais, as desigualdades da população, principalmente no que diz respeito ao acesso à água potável, saneamento e questões de higiene. Como recomendação, os autores provocam os governantes de que as intervenções de saúde pública não devem surgir apenas por causa das crises, e sim devem ser ferramentas para um planejamento inclusivo de longo prazo de implementação integrada e eficaz. Além do mais, os autores retratam que a solução para os governos se planejarem para futuras pandemias, exigem o controle e adequação dos sistemas de infraestrutura que disponibilizam água, conferem o saneamento e que, como consequência, atingem a higiene pessoal. O planejamento deve ser tratado de forma adequada para as populações que vivem em assentamentos informais, tal como sejam enfrentadas em conjunto com outras metas de desenvolvimento, como as metas das ODS.

Se tratando dos sistemas de infraestruturas, que influenciam diretamente o desenvolvimento de uma nação, Adsheada et al. (2019) tiveram como caso estudado a ilha de Curaçao. Além de identificarem como o sistema de infraestrutura interfere nas 169 metas (como mostra a Figura 1), os autores buscaram fornecer o primeiro passo em direção a um meio prático de utilização de infraestrutura para entregar os ODS, de indicadores quantitativos para tomada de decisão dos envolvidos eficaz.

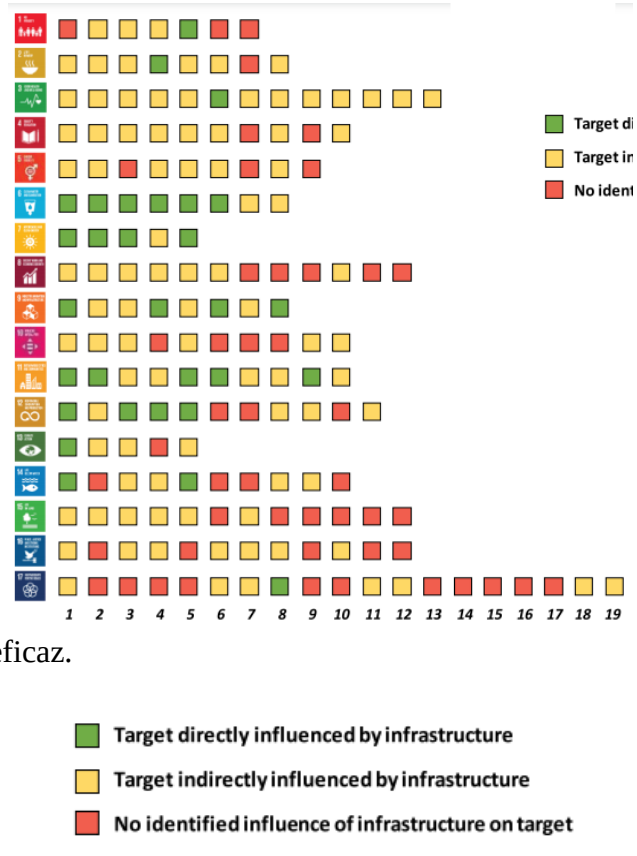


Figura 1 – Associação das 17 ODS com o Sistema de Infraestruturas. Fonte: Adsheadaet al. (2019).

Conforme a Figura 1, das 17 ODS, seis não são alvos de influência direta ao sistema de infraestrutura. As que apresentam maiores

influências são: (i) Objetivo 7 - Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos, representando 80% de influência; (ii) Objetivo 6 - Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos, representando 75%; (iii) Objetivos 9 e 11, sendo, Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e; Fomentar a inovação e tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, respectivamente, ambos influenciam 50% diretamente nas infraestruturas e; (iv) Objetivo 12 - Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, representando 36,4%.

No que diz respeito às infraestruturas de transportes, associado com acessibilidade urbana, implementações de políticas públicas, relacionadas com os ODS podem ser notadas. Por exemplo, no caso da cidade de João Pessoa, localizada no estado da Paraíba, no Brasil, algumas ruas apresentam o rebaixamento das calçadas, ou usando seu nome correto, uma redução de percurso de travessia, no âmbito de inclusão da pessoa com deficiência (PcD). O mais interessante é que, além dessa medida estar favorável aos ODS, o governo sinalizou (como identifica a Figura 2), os 17 objetivos, buscando trazer o conhecimento, e de certo modo inclusão do tema à população.



Figura 2 – Rampa de Acessibilidade com Informações dos 17 ODS

Já, em relação ao sistema de transporte aéreo, Di Vaio e Varriale (2020) buscaram analisar a ligação dos ODS com o modo aéreo. Os autores analisaram sete aeroportos da Itália em termos de infraestrutura. Como produto, foi averiguado que os aeroportos estão longe de cumprir os 17 objetivos, especialmente os ODS 11 e 17. O estudo finaliza com a importância de se criar condições reais para se desenvolver e implementar, de modo eficaz, arquiteturas organizacionais adequadas e programas de treinamento e gestão educacional para atingir os objetivos dos ODS no setor aéreo, contribuindo então, com a sustentabilidade aeroportuária.

3. SUSTENTABILIDADE AEROPORTUÁRIA

A sustentabilidade aeroportuária é tema de grande importância para qualquer sistema, incluindo os sistemas de transportes, e assim, o transporte aéreo. Grande parte das pesquisas voltadas a sustentabilidade aeroportuária se concentram no desenvolvimento de novos tipos de produtos verdes, incluindo bicombustíveis, aeroportos ecológicos, materiais de construção reciclados, projetos de reutilização de água e outras práticas sustentáveis.

Graham e Guyer (1999) foram um dos pioneiros na questão de estudos voltados a sustentabilidade. Tinham como objeto averiguar as relações entre as políticas de liberalização do transporte aéreo na União Europeia (UE) e aquelas voltadas para a sustentabilidade ambiental. O artigo analisa as respostas contraditórias dos principais stakeholders da indústria de transporte aéreo, concentrando-se nas estratégias ambientalmente incompatíveis adotadas pelas companhias aéreas, em um mercado competitivo. Na época, foi concluído que as restrições de capacidade ambiental nos aeroportos iriam efetivamente determinar o desenvolvimento do transporte aéreo na UE.

Douglas e Lawson (2003) analisaram a sustentabilidade aeroportuária com a visão de materiais construtivos. Como resposta, uma melhor sustentabilidade em obra é alcançada por meio de materiais recicláveis, como exemplo, material dragado como parte da manutenção normal do canal de navegação do rio Delaware, na construção de uma nova pista de pouso e decolagem no Aeroporto Internacional da Filadélfia.

Em 2019, Kazda, Hromádka e Mrekaj estudaram a importância dos aeroportos

regionais para a questão da sustentabilidade econômica de uma região em que está inserido o aeroporto. Os aeroportos regionais apresentam problemas de equilíbrio de contas, não apenas devido aos baixos volumes de passageiros, mas também a outros recursos de receita limitados, como restrições aos serviços não aeronáuticos e taxas de estacionamento, que são parte substancial das receitas de aeroportos médios e de grande porte. Considera-se que um pequeno aeroporto com uma movimentação anual inferior a 200.000 passageiros não é capaz de cobrir os seus custos operacionais e deve ser subsidiado. Ao mesmo tempo, os aeroportos são importantes estimuladores e catalisadores do crescimento e desenvolvimento econômico regional.

Rice et al. (2020) examinaram algumas possíveis variáveis que afetam a disposição do consumidor em pagar um aumento adicional no preço da passagem para voos que reduzem a quantidade de emissões de efeito estufa. O resultado mostrou que mulheres estão mais dispostas, para voos domésticos e mais curtos, pagar a mais no bilhete aéreo.

Por conseguinte, no cenário de incertezas trazido pela pandemia da Covid-19, operados aeroportuários vêm buscando medidas de se auto-reinventar, contexto este com ênfase para a questão de sustentabilidade econômica e operacional.

Em se tratando de sustentabilidade econômica, Serrano e Kazda (2020), indicam que, para a sustentabilidade financeira, os gestores aeroportuários devem contratar menos pessoal, finalizar contratos não essenciais, fechar ou reduzir áreas não operacionais, atrasar despesas não essenciais, reduzir custos com os fornecedores e terceirizar serviços que não são primordiais para a funcionalidade do aeroporto.

3.1. COVID-19 x Transporte Aéreo

O tema de tecnologias aeroportuárias, antes mesmo do enquadramento da Covid-19, já era algo estudado na literatura, como em questões de melhoramento do nível de serviço ou aceitação das tecnologias perante os passageiros (Negri et al., 2019). Porém, no cenário pós-pandêmico, voltado às circunstâncias de sustentabilidade operacional, muitas tecnologias vêm sendo mais discutidas pelos operadores aeroportuários e gerando confiança e forças em sua implementação nos aeroportos. Afinal, estudos realizados na China e no Brasil mostraram que rotas de tráfego aéreo e volume de passageiros internacionais revelam uma forte correlação com o aumento de casos do COVID-19 (Lau et al., 2020; Candido et al, 2020)

Candido et al (2020) concluíram que mais de 50% de todos os casos importados para o Brasil, seriam de passageiros infectados vindos da Itália e cerca de 9% e 8% dos casos seriam de passageiros infectados vindos da China e da França.

Em março de 2020 a ANAC criou o um guia com protocolos sanitários recomendados aos operadores aeroportuários e companhias aéreas (ANAC, 2020). O documento que é baseado nas recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), Ministério da Saúde e Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) recomenda ações necessárias para a manutenção da segurança das operações e tem por objetivo mitigar os riscos de contágio.

O Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos utilizou de tecnologias para tentar amenizar o possível contágio entre os passageiros, assim como contribuir para o sentimento de segurança do passageiro. O aeroporto adotou o controle de temperatura dos passageiros por câmeras especiais. Ademais, alguns QR codes foram instalados nos terminais para evitar aglomerações dos passageiros nos displays informativos de voos, assim o passageiro acompanha o status do seu voo pelo próprio celular (GruAirport, 2020).

Os efeitos da Covid-19 na continuidade de controle e planejamento de projetos e nas operações do aeroporto se manifestarão em particular no distanciamento social, que afetará a capacidade do terminal aeroportuário, assim como o nível de serviços prestados. A aceleração da implantação de tecnologias biométricas também será necessária, o que exigirá melhorias no processo de planejamento (Serrano e Kazda, 2020). Além disso, os autores interpretam que os aeroportos que permanecerem resilientes, com estratégias sustentáveis, serão capazes de oferecer uma variedade maior de bens e serviços não operacionais aos passageiros aéreos.

Dentro desse contexto, há também de se pensar em aeroportos sustentáveis do ponto de vista sanitário, o passageiro não pode ter receio de utilizar o transporte aéreo, portanto é esperado uma mudança considerável nos processos e protocolos sanitários aeroportuários como já vem acontecendo.

4. DADOS E MÉTODO BIBLIOMÉTRICO

Falcão et al. (2020) avaliaram o estado da arte sobre o tema transporte aéreo conforme publicações realizadas por instituições brasileiras, buscando identificar as áreas em que há maiores avanços de pesquisa e as áreas nas quais se podem observar lacunas. Os resultados apontam poucos estudos realizados nas linhas de pesquisa sobre Desenvolvimento Social, Meio Ambiente, Mobilidade e Sustentabilidade, com poucas publicações ao longo dos anos.

Ginieis et al. (2012) analisaram 1.059 artigos na área de transporte aéreo, entre os anos de 1997-2009. O tema de gerência foi considerado o mais estudado e a revista Journal of Air Transport Management (JATM) representou por 521 artigos publicados dos 1.059. Tanriverdi, Bakir e Merket (2020) averiguaram 1.483 artigos do Journal of Air Transport Management entre os anos de 2001 a 2019. Como resultado, apenas 7% dos estudos apresentou análises de questões ambientais e 6% de ciências ambientais, sendo assim, poucos trabalhos envolvidos com requisitos de sustentabilidade.

Em geral, em artigos que fazem a revisão bibliométrica, é necessário à coleta de elementos bibliográficos relevantes dos artigos, como ano, nome do colaborador, afiliações e palavras-chave a serem analisados para se obter informações e interpretações (Das, 2013). Além disso, Saracevic e Garfieldd (2010) ainda consideram o número de publicações, número de citações, índice-H, artigos com maior número de citações e o número de colaboradores.

Neste artigo, o propósito é realizar uma revisão bibliométrica sobre aspectos da sustentabilidade na área de transporte aéreo, portanto somente artigos nessa temática foram selecionados. Para isso, primeiramente, foram utilizadas as palavras-chave na busca, compreendendo por “Sustainable Airport”, “Airport Sustainability”, “Air Transport Sustainability”, “Airline Sustainability”, “Sustainable Airline”, “SDG Airport”, “SDG Air Transport” e“SDG Airline”. A pesquisa foi executada das bases provenientes da Scopus e da Web of Science (WOS).

Posteriormente, foram exportados os elementos bibliográficos relevantes para a análise bibliométrica. Nesse artigo considerou-se o número de publicações, ano da publicação, autores, área de atuação, titulação, instituição de vínculo local de origem do estudo, idioma, palavras-chave e resumo. Para mais, foi feita a análise dos dados das duas bases, de forma a eliminar informações duplicadas, de modo que, posteriormente, a análise pelo software CiteSpace se torne mais preciso.

De acordo com Chen (2014), o software CiteSpace tem por finalidade responder às perguntas sobre o domínio do conhecimento, em que abrange uma definição ampla do campo científico, de uma área de investigação, ou de uma disciplina científica. Ainda, o domínio do conhecimento é geralmente retratado por um conjunto de documentos bibliográficos de publicações relevantes.

Por fim, foi realizado a identificação dos autores proeminentes e referências utilizadas pelos artigos selecionados, por meio da pesquisa de frequência de citação e centralidade, utilizando o software CiteSpace. Importante ressaltar que o foco da pesquisa está relacionado com algumas subáreas do Sistema de Transporte Aéreo conforme definido por Schmitt e Gollnick (2016), que são companhia aérea e aeroporto.

5. RESULTADOS

No total foram encontrados 62 artigos na base Scopus e 43 na base WOS, totalizando 105 artigos entre 2001 e 2020, sendo 2001 a data do primeiro artigo que encontrado sobre o assunto. Os primeiros resultados foram analisados no software CiteSpace, sem ter sido feita nenhuma limpeza nos dados encontrados, algumas incoerências foram encontradas, mas

há resultados preliminares interessantes, como identifica a Figura 3 e Figura 4.



Figura 3 – Países que vem estudando a respeito de Sustentabilidade Aeroportuária

Em um segundo momento, foi feito um tratamento nos dados encontrados nas duas bases diferentes, de forma a remover os artigos duplicados e com isso ter uma representação fiel do estado da arte. Essa análise de duplicados foi feita e no total ficaram somente 67 artigos, demonstrando que pesquisar em duas bases não necessariamente aumenta a precisão do estudo.

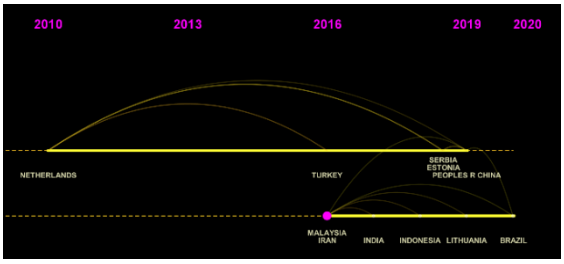


Figura 4 – Países de Estudo em Relação a Periodicidade

Em um segundo momento, foi feito um tratamento nos dados encontrados nas duas bases diferentes, de forma a remover os artigos duplicados e com isso ter uma representação fiel do estado da arte. Essa análise de duplicados foi feita e no total ficaram somente 67 artigos, demonstrando que pesquisar em duas bases não necessariamente aumenta a precisão do estudo.

Com isso, foi possível verificar avaliações preliminares quanto à distribuição de artigos ao longo do tempo, conforme histograma da Figura 5. Percebe-se que o assunto é extremamente novo e que a partir de 2015 o número de estudos aumentou consideravelmente, tendo o seu ápice em 2020.

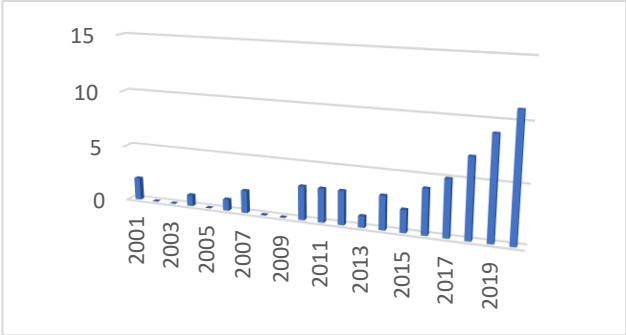


Figura 5 – 67 artigos de 2001 a 2019

Foram feitos clusters com as palavras-chaves mais citadas nos artigos considerados no software, aquelas que tiveram a maior repetição foram: airline industry, sustainability, airport, air transportation e air traffic control.

Foram feitos clusters com os principais autores, aqueles que tiveram a maior repetição foram: Graham; Baxter e Upham.

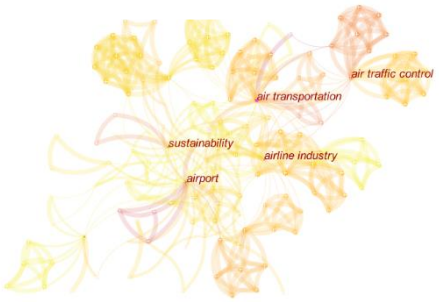


Figura 6 – Cluster com Palavras-chaves mais empregadas

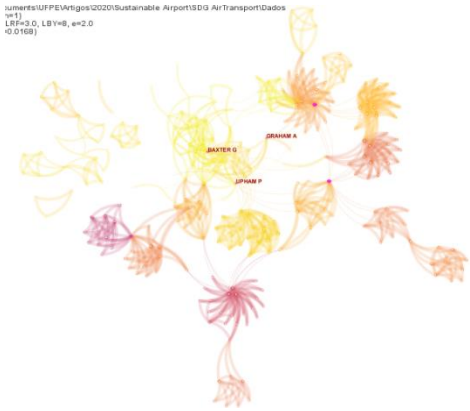


Figura 7– Cluster com Principais Autores que Estudam Sustentabilidade Aeroportuária

6. CONCLUSÃO

O estudo teve por objetivo analisar, de um modo mais sistemático, assuntos, autores, países, palavras-chaves de artigos em relação a sustentabilidade aeroportuária. Além de verificar se os artigos que dissertam sobre sustentabilidade aeroportuária delimitam uma ligação com os objetivos de desenvolvimento sustentável da agenda de 2030.

Assim pode-se concluir que apenas um artigo retrata o sistema de transporte aéreo com os ODS, mostrando a lacuna no que diz respeito ao tema de pesquisa. Além do mais, dos 65 artigos refinados, a sustentabilidade é retratada de diversas disciplinas, desde materiais, operação, e até mesmo, as mais atuais, da sustentabilidade econômica, destas, algumas em questão da pandemia da COVID-19.

Os países que mais estudam o tema são países da Europa e da Ásia. Em que ocorreu um aumento gradativo de 2015 até 2020, mas ainda pode-se considerar um aumento não relevante.

REFERÊNCIAS

Adsheada D.; Thacker S.; Fuldauer L. I.; Hall J. W. Delivering on the Sustainable Development Goals through long-term infrastructure planning. Global Environmental Change 59 (2019) 101975. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101975

Borin de Oliveira Claro, Priscila; Pimentel Claro, Danny; Amâncio, Robson. Entendendo o conceito de sustentabilidade nas organizações. Revista de Administração - RAUSP, vol. 43, núm. 4, octubre-diciembre, 2008, pp. 289-300 Universidade de São Paulo São Paulo, Brasil

Chen, C. (2014) o CiteSpace Manual. http://cluster.cis.drexel.edu/~cchen/citespace/

Citespace.http://cluster.cis.drexel.edu/~cchen/citespace/

Das, P. K. (2013). Journal of Informetrics: A bibliometric profile. DESIDOC Journal of Library and Information Technology, 33(3), 243–252. http://doi.org/10.14429/djlit.33.3.4610

Di Vaio A.; Varriale L. SDGs and airport sustainable performance: Evidence from Italy on organisational, accounting and reporting practices through financial and non-financial disclosure. Journal of Cleaner ProductionVolume 249, 10 March 2020, 119431. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119431

Douglas I.; Lawson N. Airport construction: materials use andgeomorphic change. Journal of Air Transport Management 9 (2003) 177–185. DOI: https://doi.org/10.1016/S0969-6997(02)00082-0

Falcão A. V.; Da Silva F. G. F.; Oliveira F. H. L.; Negri N. A.R.; Andrade M. O.; Brasileiro A.; Gomes R. A.; Macário R. Scientific investigations in air transport about Brazil: A bibliometric review. Journal Case Studies

Ginieis, M.; Sánches-Rebull, M.; Campa-Planas, F. The academic journal literature on air transport: analysis using systematic literature review methodology. Journal of Air Transport Management, v. 19, p. 31-35, 2012. http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2011.12.005

Graham G.; Guyer C. Environmental sustainability, airport capacity and European air transport liberalization: irreconcilable goals? Journal of Transport Geography 7 (1999) 165-180. DOI: https://doi.org/10.1016/S0966-6923(99)00005-8

Gru Airport (2020). Website GruAirport. Disponivel em: https://www.gru.com.br/pt/passageiro/noticias-detalhe?code=216 acessado em 13/09/2020.

Industry High Level Group (2020). Aviation Benefits Report 2019. Disponível em: https://www.icao.int/sustainability/Pages/IHLG.aspx acessado em 13/09/2020.

Kazda A.; Hromádka M.; Mrekaj B. Small regional airports operation:

unnecessary burdens or key to regional development. Transportation Research Procedia 28 (2017) 59–68. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.169

Macmillan A.; Smith M.; Witten K.; Woodward A.; Hosking J.; Wild K.; Field A. Suburb-level changes for active transport to meet the SDGs: Causal theory and a New Zealand case study. Science of the Total Environment 714 (2020) 136678. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136678

NaçõesUnidasBrasil (2020). Website das Nações Unidas do Brasil. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/ acessado em 12 de setembro de 2020.

Negri N. A. R.; Borille J. M. R.; Falcão V. A. Acceptance of biometric technology in airport check-in. Journal of Air Transport Management. Volume 81, October 2019, 101720. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101720

Parikh P.; Diep L.; Gupte J.; Lakhanpaul M. COVID-19 challenges and WASH ininformal settlements: Integrated action supported bythesustainabledevelopmentgoals. Cities 107 (2020) 102871. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102871

Rice C.; Ragbir N. K.; Rice S.; Barcia G. Willingness to pay for sustainable aviation depends on ticket price, greenhouse gas reductions and gender.Technology in Society.60 (2020) 101224. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.101224

Saracevic, T., & Garfieldd, E. (2010). On Measuring the Publication Productivity and Citation Impact of a Scholar: A Case Study, 185–199.

Schmitt, Dieter and Gollnick, Volker. Air Transport System. Springer Wien Heidelberg New York Dordrecht London. Springer-Verlag Wien 2016.DOI 10.1007/978-3-7091-1880-1

Serrano F; Kazda A. The future ofairport post COVID-19. Journal of Air Transport Management 89 (2020) 101900.DOI: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101900

Shulla K.; Filho W. L.; Sommer J. H.; Salvia A. L.; Borgemeister C. Channels of collaboration for citizen science and the sustainable development goals. Journal of Cleaner Production 264 (2020) 121735. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121735

Tanriverdi G.; Bakir M.; Merket R. What can we learn from the JATM literature for the future of aviation post Covid-19? – A bibliometric and visualization analysis. Journal of Air Transport Management Volume 89, October 2020, 101916. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101916

Candido, D. D. S.; Faria, N. R.; Watts, A.; Abade, L.; Kraemer, M. U. G.; Pybus, O. G.; Croda, J.; Oliveira, W.; Khan, K.; & Sabino, E. C. 2020. Routes for COVID-19 importation in Brazil. Journal of Travel Medicine, v. 27, n. 3. https://doi.org/10.1093/jtm/taaa042

Lau H, Khosrawipour V, Kocbach P, Mikolajczyk A, Ichii H, Zacharksi M, Bania J, Khosrawipour T. 2020. The association between international and domestic air traffic and the coronavirus (COVID-19) outbreak, Journal of Microbiology, Immunology and Infection, Available; online March 28, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmii.2020.03.026.

ANAC (2020) Protocolos sanitários para as operações no setor da aviação civil em período de pandemia. Disponível em: https://www.anac.gov.br/coronavirus/empresas-aereas/veja-tambem/orientacoes-para-operadores-aereos. Acessado em 02/10/2020.

.

A INFLUÊNCIA DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO NA SEGURANÇA OPERACIONAL AEROPORTUÁRIA

Aldaianny de Oliveira Maia, Renata de Souza Sales, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: aldaiannymaia@det.ufc.br

PAPER ID: SIT209

RESUMO

A ocorrência de acidentes durante as operações aéreas é um evento raro, principalmente pelo desenvolvimento do transporte aéreo, que tornou esse meio mais seguro com o passar dos anos. Diante disso, garantir a segurança operacional é importante, sobretudo nas etapas de pouso e decolagem, por meio de um adequado monitoramento das condições de aderência dos pavimentos aeroportuários. Assim, este estudo avalia a segurança operacional por meio da condição de aderência pneu-pavimento de uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Para tanto, foram analisados os valores de macrotextura, de coeficiente de atrito e de ocorrências de remoção do acúmulo de borracha no período de 2015 a 2019. Os valores das medições desses parâmetros foram comparados com aqueles que são regulamentados no Brasil pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Os resultados indicam valores muito próximos aos mínimos recomendados para o coeficiente de atrito e a macrotextura, o que pode afetar a segurança operacional. Constatou-se que a análise por terço de pista permite um melhor detalhamento para o estudo, e que o primeiro terço no qual ocorrem as operações é o que apresenta as piores condições de aderência. Além disso, percebe-se que a remoção do acúmulo de borracha ocorreu com frequência inferior à recomendada em alguns períodos, o que pode ter influenciado o comportamento da aderência. Dessa forma, pode-se concluir que a aderência pneu-pavimento é um fator importante para a segurança das operações de pouso e decolagem. Ademais, o adequado monitoramento desse parâmetro pode permitir uma modelagem mais apropriada acerca do desempenho dos pavimentos de pistas de pouso e decolagem.

Keywords: Aeroporto, Segurança, Aderência, Macrotextura, Coeficiente de atrito.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) com os recursos financeiros para o desenvolvimento desta pesquisa.

1. INTRODUÇÃO

O nível de segurança das atividades aéreas cresceu desde o início de suas operações na década de 1920. No entanto, o número de acidentes ainda é uma preocupação da indústria da aviação civil em todo o mundo. Nesse sentido, as fases de pouso e decolagem são as mais críticas de um voo. De acordo com CENIPA (2021), em torno de 52% dos acidentes e 61% dos incidentes graves identificados nos aeródromos brasileiros entre 2010 e 2019 ocorreram durante essas fases. Segundo Liou et al. (2008), o favorecimento de condições aceitáveis de segurança para as operações de pouso e decolagem é importante para o êxito do transporte aéreo.

A aderência entre o pneu e a superfície do pavimento é essencial para operações seguras de pouso e decolagem. Esse parâmetro é composto pelo atrito entre o pneu e o pavimento e pela macrotextura da superfície da pista. O atrito sofre influência de vários fatores, entre eles clima e a ineficácia das ações de manutenção do pavimento (ICAO, 2004, Rodrigues Filho, 2006, e Mota et al., 2016). Além disso, o acúmulo de contaminantes nas pistas de pouso e decolagem contribui para a redução do coeficiente de atrito.

Nesse âmbito, o processo de remoção do acúmulo de borracha na pista é uma atividade importante para a manutenção das pistas de pouso e decolagem, uma vez que consiste em preservar ou restaurar as condições de aderência pneu-pavimento. O hidrojateamento de água a alta pressão é o método comumente utilizado na realização desse processo no Brasil.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da aderência pneu-pavimento na segurança operacional de uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Para tanto, foram analisados os valores de macrotextura, coeficiente de atrito e ocorrências de remoção de borracha no período de 2015 a 2019.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com a aplicação de uma metodologia multicritérios Cunha *et al.* (2021) monitoraram a manutenção de pistas de pouso e decolagem por meio da percepção de risco em aeroportos. O estudo identificou que sete parâmetros concentravam 80% do risco percebido pelos profissionais consultados. Entre os fatores destacados estavam o coeficiente de atrito e a profundidade de macrotextura. Além disso, o coeficiente de atrito estava entre os três fatores com maior peso na análise, que somaram 52% da percepção dos entrevistados. Diante disso, os autores concluíram que os recursos destinados à manutenção devem ser mais bem distribuídos de maneira que seja destinada maior atenção aos fatores mais relevantes.

A segurança de pavimento está relacionada tanto com o atrito superficial quanto com a textura do pavimento. Um pavimento deve proporcionar atrito adequado, além de capacidade de drenagem para minimizar o número de acidentes que ocorrem como resultado de deficiências na aderência entre o pneu e o pavimento. O nível de adequação da aderência de um pavimento à segurança pode ser mensurado pela condição da superfície, como porosidade ou desgaste. (Flintsch *et al*., 2003).

Novos pavimentos, compostos de macrotextura aberta, microtextura áspera e com ausência de depósitos de borracha em sua superfície, apresentam melhores condições de atrito em situações críticas, com presença de película de água. No entanto, pavimentos que passaram por processo de desgaste, com microtextura polida, apresentam atrito reduzido e, consequentemente, oferecem frenagem deficiente. Além disso, o acúmulo de borracha preenche a macrotextura desses pavimentos, o que pode levar à ocorrência de hidroplanagem. (Leocádio, 2014)

Quariguasi *et al.* (2019) analisaram a evolução dos valores de coeficiente de atrito e macrotextura ao longo de um período de três anos. O objetivo do estudo foi examinar o desempenho desses parâmetros de em uma pista de pouso e decolagem com revestimento de Camada Porosa de Atrito (CPA). Foram realizados testes de igualdade de médias para a profundidade de macrotextura, por meio da análise das variâncias (ANOVA), em que a hipótese nula foi de que todas as médias eram iguais para um nível de significância de 5%. O teste não mostrou indícios suficientes para

rejeitar a hipótese nula de que os valores das médias dos grupos eram iguais.

Por meio da análise estatística Quariguasi *et al.* (2019) concluíram que o coeficiente de atrito apresentou pouca variação ao longo do período analisado, com variações cíclicas observadas e justificadas pela realização das remoções de borracha periódicas. Por fim, o estudo pontuou que a profundidade de macrotextura apresentou tendência de crescimento a longo prazo.

O estudo de Sales *et al.* (2021) avaliou três revestimentos distintos, com o objetivo de verificar a existência de correlação entre a prática de remoção de borracha e a melhoria da aderência pneu-pavimento. Os autores estudaram a CPA, o concreto asfáltico e o *grooving*, que tiveram profundidade de macrotextura e coeficiente de atrito analisados por meio de testes estatísticos.

Observou-se que a remoção de borracha é um processo de manutenção eficiente nos aeroportos, uma vez que ela possibilita que os níveis mínimos exigidos pelos regulamentos para macrotextura e coeficiente de atrito sejam mantidos. Percebeu-se que a remoção de borracha proporciona reações diferentes em cada tipo de revestimento. No entanto, o processo não garante aumentos significativos a longo prazo. Dessa forma, esse procedimento não deve ser a única ferramenta de manutenção das pistas de pouso e decolagem (Sales *et al.*, 2021).

Os resultados do estudo de Chen *et al.* (2008) indicaram que a borracha em um pavimento aumenta de espessura cerca de 0,05 µm a cada pouso de aeronave. Além disso, os autores observaram que, nas regiões de toque das aeronaves durante o pouso, os valores de coeficiente de atrito estavam abaixo do mínimo permitido. No que diz respeito à macrotextura, os autores concluíram que pequenas mudanças nesse parâmetro já influenciam no coeficiente de atrito, de maneira que os dois estão diretamente relacionados. Por fim, conclui-se que um aumento de 0,4 mm na espessura de depósito de borracha impacta em um decréscimo de 0,2 no coeficiente de atrito mensurado pelo *Saab surface Friction Tester* (SFT).

O processo de remoção de borracha dos pavimentos aeroportuários é a principal atividade de manutenção que ocorres nas pistas de pouso e decolagem brasileiras. No entanto, o estudo desenvolvido por Rodrigues Filho (2006) demonstrou que o processo realizado por meio de hidrojateamento reduz significativamente o coeficiente de atrito em uma pista, além de acelerar o processo de perda de finos e desagregação do revestimento.

A macrotextura é um fator de relativa importância para a segurança das pistas de pouso e decolagem. Segundo Rodrigues Filho (2006), a macrotextura é essencial à adequada drenagem de um pavimento aeroportuário. O estudo observou que, em pavimentos com alto teor de contaminação por acúmulo de borracha, a macrotextura apresenta redução em seus valores.

Silva (2008) observou que a execução de *grooving* em uma pista de pouso e decolagem proporciona melhorias significantes na aderência pneu-pavimento, devido a capacidade drenante desse tipo de revestimento. No entanto, o emborrachamento da superfície da pista compromete a segurança das operações, de maneira que se comprovou por meio de análises estatísticas que o processo de remoção por meio de hidrojateamento proporciona melhorias significativas na macrotextura do pavimento e consequentemente na drenabilidade. O estudo observou que a aderência apresentou condição três vezes superior após o procedimento de remoção do acúmulo de borracha.

3. MÉTODO DE PESQUISA

O estudo foi realizado considerando uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Os dados utilizados foram obtidos por meio dos relatórios técnicos de medição de macrotextura e de coeficiente de atrito fornecidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

Considerou-se neste estudo as informações do período de 2015 a 2019. Todas as medições obtidas seguiram as recomendações especificadas pelos regulamentos revogados e substituídos por ANAC (2021). Para os relatórios de macrotextura, os dados foram obtidos pelo ensaio de mancha de areia. Por sua vez, os dados de coeficiente de atrito foram levantados

por meio do *Grip Tester*, com velocidade de 65 km/h, a 3 m e 6 m a partir do eixo da pista de pouso e decolagem.

As datas de ocorrência de remoção de borracha, como atividade de manutenção da pista de pouso e decolagem analisada, foram obtidas a partir dos relatórios de macrotextura e de coeficiente de atrito. No total, foram analisados 21 relatórios de medição da macrotextura e 28 de coeficiente de atrito. Durante o período, observou-se a realização de 11 atividades de remoção de borracha.

Para a análise considerou-se a divisão da pista de pouso e decolagem em terços, para facilitar a visualização das informações. Além disso, cada terço está sujeito a solicitações diferentes, dependentes das condições de operações, seja pouso ou decolagem. Nesse sentido, o primeiro terço, por conter a zona de toque, é aquele que possui maior solicitação durante pousos e decolagens.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos relatórios das condições de aderência, macrotextura e coeficiente de atrito, foi possível observar as datas de remoção de borracha, ocorridas anterior a cada uma das medições. Além disso, conforme a média de pousos na pista de pouso e decolagem observou-se que, para 2015, a remoção de borracha, conforme ANAC (2021), deveria ser realizada a cada 120 dias, enquanto para os anos seguintes a cada 180 dias. As datas de remoção de borracha podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 Datas de remoção de borracha na PPD conforme relatórios considerados

Data	*Data*	*Data*
20/11/2014	23/10/2016	**14/11/2017**
04/04/2015	**21/03/2017**	13/05/2018
10/06/2015	**24/03/2017**	08/11/2018
10/11/2015	**08/11/2017**	15/05/2019
30/06/2016	**12/11/2017**	

As datas destacadas em negrito foram obtidas em diferentes relatórios e indicam a existência da realização da atividade de remoção de borracha em datas próximas, o que seria inconsistente, visto que é um curto período, inferior a uma semana, entre remoções, e sugere que a data inserida em algum dos relatórios pode ter sido equivocada. Portanto, para este trabalho considerou-se as datas de remoção ocorridas em 21/03/2017 e 08/11/2017, para o conjunto destacado. Assim, percebeu-se que apenas 40% das remoções de borracha foram realizadas considerando a frequência estabelecida por ANAC (2021).

A atividade de remoção de borracha é uma atividade que contribui para a melhoria das condições de aderência pneu-pavimento e, por consequência, a resistência à derrapagem durante as operações de pousos e decolagens (Chen *et al.*, 2008; De Luca *et al.*, 2016; Biancardo *et al.*, 2020; Sales *et al.*, 2021). Diante disso, o não atendimento das frequências estabelecidas para essa atividade podem influenciar nos valores obtidos para o coeficiente de atrito e a macrotextura, de modo a aumentaram as chances de não atendimento aos limites estabelecidos.

Considerando cada ponto obtido na medição ao longo do comprimento da PPD, aproximadamente, 2,2% deles foram inferiores ao valor limite estabelecido em regulamento de 0,60mm. Destaca-se que dos valores inferiores ao limite, nenhum foi inferior à 0,50mm. Quando se analisa a média, por terço da pista de pouso e decolagem, por medição, todos os valores obtidos foram superiores ao limite (Figura 1).

Quanto à classificação da macrotextura, disponível em ANAC (2021), para o primeiro terço verificou-se que 90,5% foram classificadas como aberta e 9,5%, muito aberta. Para o segundo terço verificou-se que a média, por data de medição, classificou 4,8% dos pontos analisados como de macrotextura média, 81,0% como aberta e 14,3%, muito aberta. Enquanto isso o terceiro terço, com menor solicitação durante as operações teve 9,5% como macrotextura média, 85,7% como aberta e 4,8%, muito aberta.

Observa-se para a macrotextura, Figura 1, nas medições posteriores à atividade de remoção de borracha que apenas quatro tiveram inclinação positiva, indicando um aumento, em pelo menos um dos terços em relação à medição anterior. O primeiro terço, que contém a zona de toque das aeronaves nas operações de pouso, no geral, foi o que

apresentou maiores ganhos com a atividade, visto que sua ocorrência acontece, geralmente, nos locais que apresentam maior acúmulo de borracha. Além disso, não é comum a remoção do acúmulo de borracha em todo o comprimento do segundo terço pela menor quantidade do contaminante presente neste.

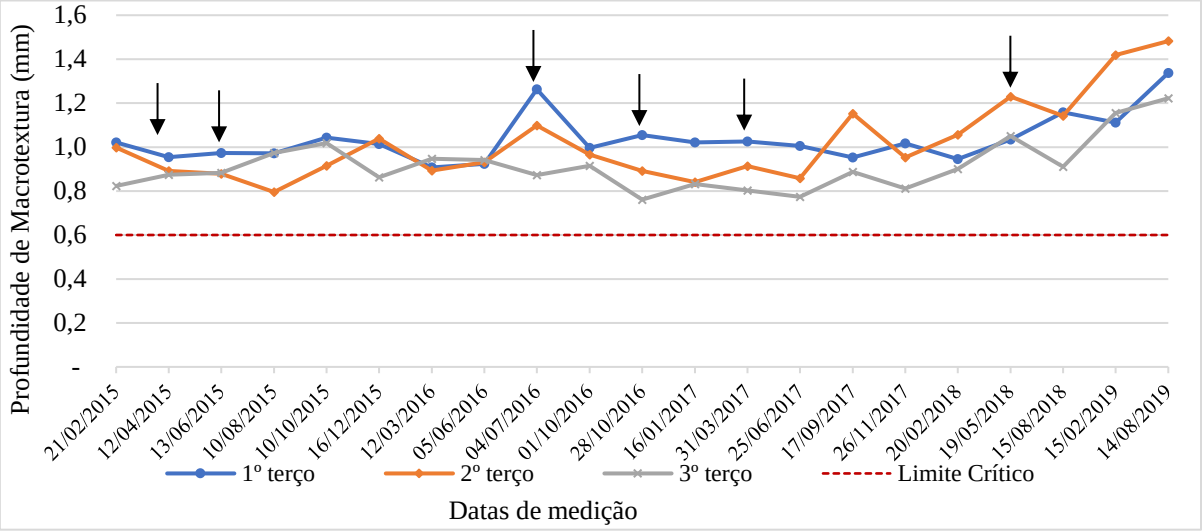


Figura 1 Média da Macrotextura por terço de PPD para cada medição.

A Figura 2 mostra o valor médio por terço, para cada uma das medições do coeficiente de atrito medido a 3m do eixo da pista de pouso e decolagem. Os valores médios observados se encontram acima dos limites críticos e de manutenção, de 0,43 e 0,53, respectivamente, estabelecidos em ANAC (2020). Além disso, o primeiro terço foi o que apresentou menores valores médios para o parâmetro, o que pode ser associado à maior solicitação deste. Para as medições realizadas após a remoção do acúmulo de borracha do revestimento, verifica-se uma tendência de aumento nos valores médios. Para os valores pontuais medidos a 3m do eixo, a cada 100m, para ambos os lados, observou-se que apenas 0,38% estavam inferiores ao limite de manutenção, com valores maiores ou iguais a 0,5.

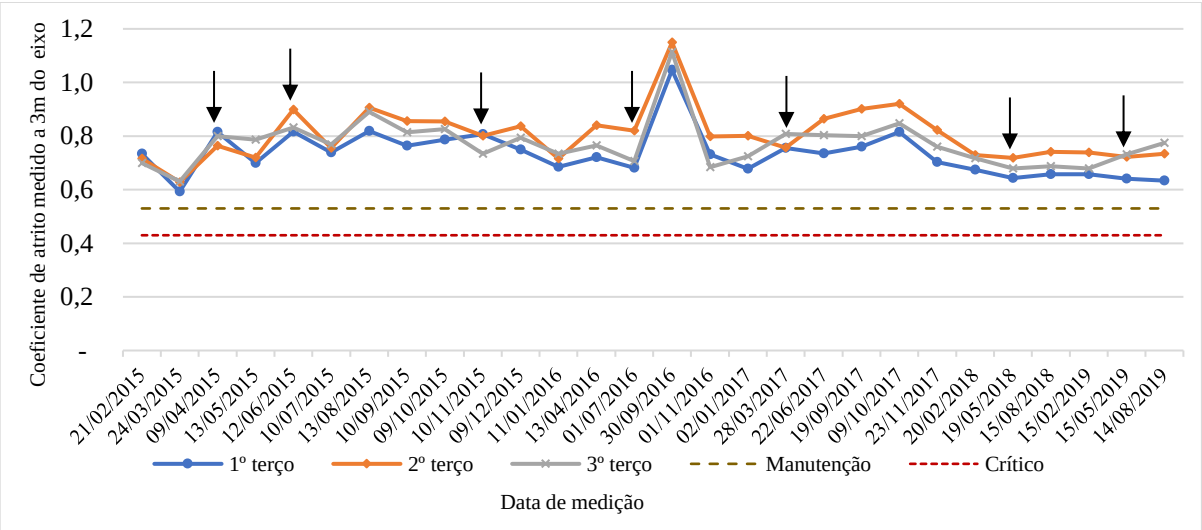


Figura 2 Média do coeficiente de atrito a 3 m do eixo, por terço de PPD, para cada medição.

A distribuição dos valores médios por terço e data de medição para o coeficiente de atrito medido a 6m do eixo da pista de pouso e decolagem pode ser observada na Figura 3. Para a variável não houve a existência de valores pontuais inferiores ao limite de manutenção de 0,53 estabelecido em ANAC (2020). Como, para o caso analisado, a

utilização da pista pelas aeronaves para a distância a 6m do eixo não é tão frequente, devido ao mix de aeronaves que opera no aeroporto, verifica-se que não existe, no geral, um comportamento padrão de um terço mais solicitado. E ainda, nota-se que o primeiro terço, entre novembro de 2015 e setembro de 2016, foi o que apresentou maiores valores da variável medida; o que não acontece para a medição realizada a 3m do eixo.

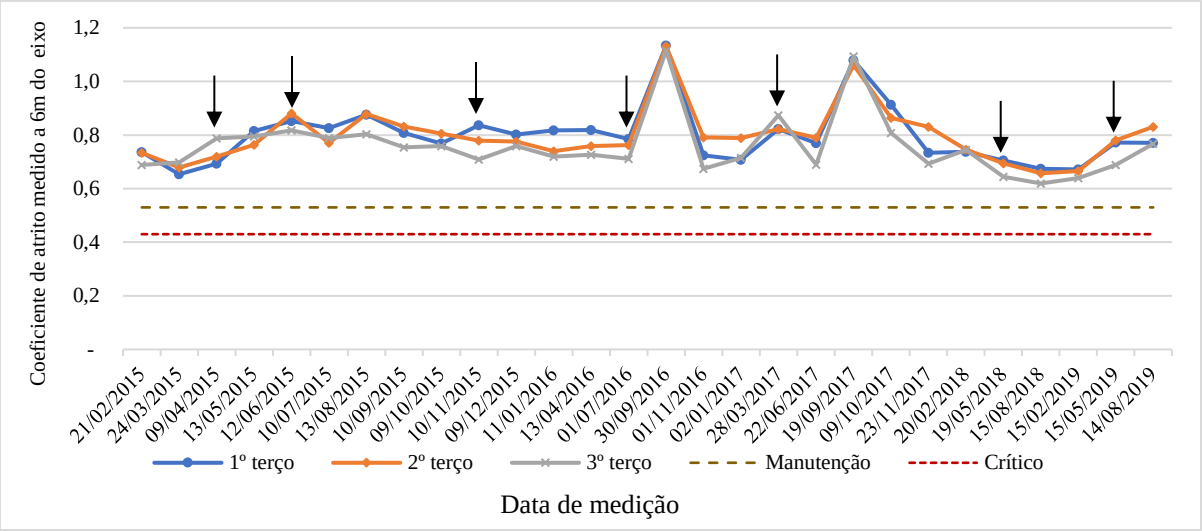


Figura 3 Média do coeficiente de atrito a 6 m do eixo, por terço de PPD, para cada medição.

Para os dados de coeficiente de atrito percebe-se que ocorre menor variação entre os terços por data de medição, em comparação aos de macrotextura. Essa menor variação pode ser decorrente ao fato de a macrotextura ainda considerar um método de medição manual, dependente do operador durante o ensaio de campo e de condições climáticas como o vento, por exemplo, no momento da medição. Quando se analisa o coeficiente de variação calculado com base na média e desvio padrão do terço para cada uma das medições, Tabela 2, nota-se que os valores máximos para a macrotextura são maiores em relação ao coeficiente de atrito.

Tabela 2 Coeficiente de Variação máximos e mínimos por terço de pista

Terço	*Macrotextura*	*Coef. de atrito (3m)*	*Coef. de atrito (6m)*
1º	36,26%	14,26%	14,75%
	12,60%	7,44%	5,70%
2º	24,85%	12,42%	14,31%
	5,77%	3,61%	3,92%
3º	38,59%	13,60%	11,49%
	10,94%	5,24%	3,20%

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a segurança operacional de um pavimento aeroportuário por meio da condição de aderência pneu-pavimento de uma pista de pouso e decolagem brasileira, com revestimento em Concreto Asfáltico. Os resultados indicaram variações em ambos os parâmetros analisados – macrotextura e coeficiente de atrito - que não podem ser explicadas unicamente pelo processo de remoção do acúmulo de borracha. No entanto, foram observadas maiores variações na profundidade de macrotextura, que foram associadas, principalmente, à realização manual do ensaio e ao fato de depender de condições técnicas do operador que o realiza.

Embora tenha sido realizado um número de remoção do acúmulo de borracha ao longo dos anos, menor do que o recomendado pelo regulamento brasileiro de aviação civil vigente, não foram constatados valores de macrotextura ou de coeficiente de atrito abaixo dos mínimos exigidos. Isso indica que, embora a remoção do acúmulo de borracha não seja eficiente em aumentar esses valores a longo

prazo, e de maneira estatisticamente perceptível, o processo é capaz de manter os parâmetros acima do exigido.

Por fim, conclui-se que o método de remoção do acúmulo de borracha por meio do processo de hidrojateamento a alta pressão aplicado é eficiente na manutenção da segurança operacional dos aeroportos brasileiros. O acompanhamento do comportamento do pavimento após sua execução é importante para o gerenciamento de operações de pousos e decolagens seguras.

Referências

ANAC (2020) Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista pouso e decolagem. Instrução Suplementar Número 153.205-001, Revisão B. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.

ANAC (2021) Aeródromos - Operação, manutenção e resposta à emergência. Regulamento Brasileiro de Aviação Civil - RBAC Número 153, emenda número 05. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.

Biancardo, S. A., F. Abbondati, F. Russo, R. Veropalumbo & G. Dell'Acqua (2020). A broad-based decision-making procedure for runway friction decay analysis in maintenance operations. Sustainability, 12(9), 3516. DOI: 10.3390/su12093516.

CENIPA (2021). Aeródromos: Sumário Estatístico 2010-2019. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Brasília, DF, 82 p.

Chen, J. S., C. C. Huang, C. H. Chen & K. Y. Su (2008). Effect of rubber deposits on runway pavement friction characteristics. Transportation Research Record, n. 2068, p. 119–125.

Cunha, D. A.; Andrade, M.; Prado, L. A.; Santana, L. O. Gonçalves da Silva, M. P. (2021) RISK assessment in airport maintenance runway condition using MCDA-C. Journal of Air Transport Management, v. 90, n. June 2019, p. 101948.

De Luca, M., F. Abbondati, M. Pirozzi & D. Žilionienė, (2016). Preliminary study on runway pavement friction decay using data mining. Transportation Research Procedia, 14, 3751-3760. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.460.

Flintsch, Gw; De Leon, E; Mcghee, Kk; Al-Qadi, I. L. (2003). Pavement surface macrotexture measurement and applications. Pavement Assessment, Monitoring, and Evaluation: Pavement Design, Management, And Performance. Book Series: Transportation Research Record-Series. Issue: 1860, p. 168-177.

ICAO (2004). Manual on the regulation of international air transport. International Civil Aviation Organization. Montreal, Canada.

Leocádio, A. S. (2014). Avaliação da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Manaus/Eduardo Gomes. Dissertação. Universidade Federal do Amazonas.

Liou, James Jh; Yen, Leon; Tzeng, Gwo-Hshiung (2008). Building an effective safety management system for airlines. Journal of Air Transport Management, v. 14, n. 1, p. 20-26.

Mota, I. P. Der H., Oliveira, F. H. L., Aguiar. M. F. P. (2016). Verificação multicritério das condições físicas para a segurança operacional aeroportuária. Transportes. v. 24, n. 2, p. 21-26. DOI: /10.14295/transportes. v24i2.1033.

Quariguasi, J. B. F.; Almeida, L. C.; Oliveira, F. H. L.; Prado, L. de A.; (2019) Análise da Aderência Pneu-Pavimento Aeroportuário em Revestimento de Camada Porosa de Atrito. Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Gramado, RS. p. 1099–1109.

Rodrigues Filho, O. S. (2006). Adherence characteristics of asphalt runway surfaces. Case of São Paulo/Congonhas International Airport. Dissertation. Escola Politécnica of the University of São Paulo (The Engineering School).

Sales, R. de S., Oliveira, F. H. L. & Prado, L. A. (2021). Performance of tire-asphalt pavement adherence according to rubber removal on runways. International Journal of Pavement Engineering, v. 0, n. 0, p. 1–11.

Silva, João Paulo Souza (2008). Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários.

Zheng, B., Huang, X., Zhang, W., Zhao, R., & Zhu, S. (2018). Adhesion characteristics of tire-asphalt pavement interface based on a proposed tire hydroplaning model. Advances in Materials Science and Engineering.

.

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA PANDEMIA NA EFICIÊNCIA DOS AEROPORTOS BRASILEIROS: APLICAÇÃO DE ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS E REGRESSÃO TOBIT

Lucas Tavares de Barros Mendes[1], Viviane Adriano Falcão[1],
Hélio da Silva Queiroz Júnior[1], Francisco Gildemir Ferreira da Silva[2]
[1]Federal University of Pernambuco, [2]Federal University of Ceará

*** Corresponding author e-mail address**:helio.junior@ufpe.br

PAPER ID: SIT127

RESUMO

O crescente volume de pessoas que utilizam o transporte aéreo no Brasil e no mundo levanta pontos importantes e preocupações com o impacto da crescente adoção desse meio de transporte. Uma questão fundamental relacionada a esse modal é a relação entre o transporte aéreo e a disseminação de doenças em geral. Com a pandemia Covid-19, governos e aeroportos de todo o mundo implementaram medidas que restringem as operações aeroportuárias, com o objetivo de mitigar esse potencial de divulgação, resultando em impactos negativos nos resultados operacionais desses aeroportos. Por isso, o objetivo desta pesquisa visa analisar o impacto gerado pela pandemia Covid-19 sobre a eficiência operacional dos principais aeroportos brasileiros. Data Envelopment Analysis (DEA) foi utilizada como metodologia, em dois cenários definidos a partir dos clássicos modelos DEA BCC e CCR, a fim de estabelecer o ranking. Os dados foram utilizados de 2010 a 2020. Os resultados mostraram que não houve redução significativa nos valores de eficiência desses aeroportos, devido à pandemia Covid-19. Os modelos obtidos com regressão do tobit demonstraram influência positiva do PIB per capita nos escores de eficiência aeroportuária e expressaram a insignificância estatística da influência da privatização sob esses valores. Portanto, apesar da falta de evidências sobre o impacto direto da pandemia sobre os valores relativos de eficiência dos aeroportos brasileiros estudados período pandemia indicam uma redução considerável na movimentação de passageiros, indicando a necessidade de estudos posteriores, a fim de complementar a análise e a medição desses impactos negativos.

Palavras-chave: Transporte Aéreo, COVID-19, Eficiência.

.

1. INTRODUÇÃO

A grande movimentação internacional de passageiros envolvendo transporte aéreo, em todo o mundo, propiciada pela expansão do volume de passageiros e de destinos, principalmente nos hubs de transporte aéreo, em situação de pandemia, pode representar pontos críticos para o contingenciamento ou a disseminação da transmissão de vírus respiratórios.

A combinação da quantidade crescente de passageiros, motivada pelas facilidades do transporte aéreo, com o risco de disseminação de epidemias, tem sido motivo de preocupação de autoridades de saúde pública em todo o mundo.

Em janeiro de 2020 o novo coronavírus, ou COVID-19, é considerado emergência de saúde pública de importância internacional pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 2021), trouxe consigo, então, um conjunto de medidas e regimentos a serem cumpridos pelas empresas e operadores relacionados ao transporte aéreo. No Brasil, não foi diferente, a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC lançou, uma cartilha contendo um conjunto de recomendações e medidas a serem adotadas e seguidas pelos envolvidos com operação aeroportuária (ANAC, 2020).

O conjunto de eventos e fatores ocorridos no período, como as restrições impostas pela OMS e governos na operação aeroportuária e nas dinâmicas sociais em geral (como *lockdowns*), bem como o comportamento das companhias aéreas e até mesmo dos passageiros diante dessa pandemia global, impactaram diretamente o balanço e funcionamento destes aeroportos, levando à tona a importância de se avaliar esse impacto também a nível de eficiência dos terminais, em suas distintas condições operacionais e formatos de gestão administrativa.

Diante desse contexto, entender como e se foram afetados o desempenho dos aeroportos brasileiros se torna primordial. A avaliação de desempenho das empresas em geral pode ser realizada por meio de diferentes métricas e métodos, nesse estudo, optou-se por utilizar a Análise Envoltória de Dados, ou seja, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficiência o dos aeroportos brasileiros entre 2010 e 2020, bem como os fatores que influenciaram essa eficiência, considerando aspectos como período da pandemia e as concessões aeroportuárias.

2. O SETOR DO TRANSPORTE AÉREO NO BRASIL

De acordo com a Secretaria de Aviação Civil, do Ministério de Infraestrutura do Governo Federal brasileiro, no ano de 2019, houve uma movimentação anual de cerca de 218 milhões de passageiros, representando um aumento de mais de 193% em 15 anos. Em relação aos aeródromos brasileiros, segundo a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2022), o Brasil possui 2756 aeródromos em operação, sendo destes 2217 privados e 533 públicos, figurando como 2º país com maior quantidade de aeródromos no mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos (CIA, 2022).

2.1. Concessões aeroportuárias no Brasil

Como parte das políticas liberais implementadas pelo governo brasileiro desde 2001, pontuado por Marazzo et al (2010) como um dos fenômenos de influência do desenvolvimento do setor aeroportuário no Brasil, há a implementação de privatizações de diversos setores e empresas nacionais. Privatizar é a ação de transferência de algo estatal para o domínio da iniciativa privada, e no setor de aviação brasileira, foi posta em prática através de concessões de aeroportos públicos a empresas privadas de todo o mundo, como alternativa à responsabilidade exclusiva de gestão pública destes aeródromos à INFRAERO.

Segundo Resende (2017), o programa de privatização de aeroportos brasileiro teve início em 2011, com o leilão do Aeroporto Internacional de São Gonçalo do Amarante, no Rio Grande do Norte; o leilão fora feito em forma de teste, e se destacou por tratar-se de concessão em projeto *greenfield* – um novo aeroporto deveria ser inteiramente construído pela empresa vencedora do leilão. Desde então, ocorreram 5 rodadas de concessão de aeroportos brasileiros, resultando em um total de 23 aeroportos cedidos à gestão privada, dentre eles os aeroportos com maiores demandas de utilização; em adição, está em andamento a 6ª rodada de concessão, que compreende a cessão de 22 aeroportos, e uma 7ª rodada, composta por 16 aeroportos, já está na

etapa chamamento público de estudos (ANAC, 2022).

No caso de aeroportos brasileiros, políticas de concessão resultam em uma deterioração nos indicadores de performance gerencial da INFRAERO, não havendo sinais de que a situação será revertida (FALCÃO et al, 2021); a localização e tipo de operação dos aeroportos mostra ser muito mais determinante na influência de seus índices operacionais, estando os índices de eficiência dos aeroportos regionais muito abaixo dos índices dos aeroportos das capitais, por exemplo. Toledo et al (2021) realizou um estudo baseado na aplicação de uma metodologia SBM-DEA e uma regressão tobit para verificação da influência ou não da privatização na eficiência de 28 aeroportos brasileiros, chegando à conclusão de que as primeiras privatizações de aeroportos brasileiros não são estatisticamente relevantes para a melhoria de sua eficiência, e alguns aeroportos privatizados ainda são ineficientes nesse aspecto.

2.2. Covid-19 e os aeroportos brasileiros

Nakamura & Managi (2020) desenvolveram um estudo com base em diversos artigos relacionados ao papel do transporte aéreo na disseminação do coronavírus, com o objetivo de calcular o risco relativo de importação e exportação do vírus através de aviação civil; como resultado, todos os países considerados no estudo estavam sujeitos a esse risco, potencialmente contribuindo com a disseminação da doença. O impacto da pandemia no mercado aéreo brasileiro em 2020 foi enorme: em comparação com 2019, houve uma redução de mais de 50% (ANAC, 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto como um todo foi desenvolvido em 5 etapas, desenvolvidas em série e/ou em paralelo e de forma a estruturar sequencialmente o estudo em questão. As etapas em questão são: Escolha do tema, revisão de literatura, metodologia do estudo em si (definição dos aeroportos, composição do banco de dados, aplicação de DEA e aplicação do tobit), análise de resultados e conclusão.

A escolha do tema foi a primeira etapa do projeto em si, sendo determinante para a definição de todo o escopo do projeto, objetivos, justificativa, metodologia etc. Em seguida, foi realizada uma revisão da literatura baseado no tema escolhido, sendo composta pela leitura e análise de literatura a respeito de transporte aéreo e aeroportos em si, incluindo a importância do setor no Brasil, informações sobre as concessões dos aeroportos brasileiros e o impacto da Covid-19 no setor; estudos sobre a eficiência de aeroportos e a Análise Envoltória de Dados; e a respeito de tobit e regressões em duas etapas. Essa revisão, presente no capítulo 2 deste trabalho, foi fundamental para criação de sólida base teórica, necessária para condução de todas as demais fases do projeto.

Neste capítulo 3, serão apresentados os aeroportos selecionados para análise, a caracterização do banco de dados e variáveis escolhidas para cada aeroporto, e as etapas e procedimentos referentes às duas metodologias que serão utilizadas neste projeto, de forma combinada: Análise Envoltória de Dados (DEA) e Regressão Tobit. As variáveis escolhidas, para ambas as etapas, foram selecionadas de modo a compor devida caracterização dos aeroportos, bem como permitir a aplicação das metodologias descritas em cada etapa, de forma devida. O detalhamento da metodologia é composto pela descrição dos métodos e ferramentas utilizados nas etapas do trabalho.

Com a metodologia aplicada ao banco de dados, o decorrer do projeto é direcionado à análise e interpretação dos resultados obtidos. Esta análise estará presente no capítulo 4 abaixo, seguido do capítulo 5, onde serão expressas as conclusões e considerações finais a respeito do estudo como um todo.

3.1. Análise Envoltória de Dados – DEA e o Tobit

Uma metodologia vastamente difundida na literatura global é a aplicação de Análise Envoltória de Dados, ou DEA (*Data Envelopment Analysis*) em aeroportos (Cavaignac e Petiot, 2017). DEA é uma metodologia não-paramétrica utilizada para análise da eficiência de uma Unidade Tomadora de Decisões, ou DMU (*Decision-Making Unit*) na conversão de determinados de insumos (inputs) em produtos (outputs) (Toledo et al, 2021).

Nesse estudo foram considerados os dois modelos clássicos do DEA, o CCR, desenvolvido

por Charnes et al (1978) que considera retornos de escala constantes (*constant returns to scale* – CRS) e o BCC, desenvolvido por Banker et al (1984) para que pudessem ser considerados retornos de escala variáveis (*variable returns to scale* – VRS).

A regressão tobit foi utilizada por Toledo et al (2021) que aplicou em conjunto com o SBM-DEA, o objetivo foi verificar quais os fatores externos ao controle do operado poderiam influenciar a Eficiência.

3.2. Composição do banco de dados

Para a primeira etapa da metodologia deste trabalho, foram utilizados dados temporais anuais, de 2010 a 2020, para que a metodologia possa contemplar aspectos comparativos dos aeroportos em situação pré-pandemia, de 2010 a 2019, e em situação de pandemia, no ano de 2020, levando em consideração a pandemia mundial do Covid-19, que impactou diretamente o mercado aeroportuário global, no ano de 2020. Para a segunda etapa, foram selecionados dados referentes aos anos de análise, de fora a compor análise em Painel de Dados dos aeroportos brasileiros, para cada um dos anos da análise.

Os aeroportos escolhidos foram o Aeroporto de Guarulhos (SBGR), Aeroporto de Congonhas (SBSP), Aeroporto de Brasília (SBBR), Aeroporto do Rio de Janeiro / Galeão (SBGL), Aeroporto de Confins (SBCF), Aeroporto de Campinas (SBKP), Aeroporto de Recife (SBRF), Aeroporto de Porto Alegre (SBPA), Aeroporto de Salvador (SBSV), Aeroporto de Fortaleza (SBFZ), Aeroporto de Curitiba (SBCT), Aeroporto de Florianópolis (SBFL), Aeroporto de Belém (SBBE), Aeroporto de Manaus (SBEG), Aeroporto de Maceió (SBMO), Aeroporto de São Luís (SBSL) e Aeroporto de Campo Grande (SBCG).

A partir da revisão de literatura, foram escolhidas as variáveis a compor o banco de dados do trabalho, para ambas as etapas da metodologia. Para a primeira etapa, foram selecionadas as seguintes variáveis, com dados coletados em recortes anuais, de 2010 a 2020: oferta em ASK (*Available Seat-Kilometers*, ou Assentos-Quilômetros Disponíveis), área do terminal de passageiros (TPS), Comprimento total de pistas de decolagem/pouso, movimentação anual de passageiros (PAX) e número de decolagens no ano. A relação entre as quantidades de DMUs e soma de inputs e outputs do modelo seguem os requisitos recomendados por Banker et al (1989): quantidade de aeroportos analisados no modelo, 17, é superior a três vezes a quantidade de inputs e outputs considerados, que somam 5.

Para a segunda etapa, para devida composição do Painel de Dados referentes aos anos de análise de forma complementar metodologia aplicada na primeira etapa, foram escolhidas as variáveis score de eficiência dos aeroportos, de acordo com os resultados obtidos na primeira etapa, quantidade de casos de Covid19, PIB per-capita, área do terminal de passageiros (TPS), comprimento total de pistas de decolagem/pouso, movimentação anual de passageiros (PAX), dummy para representação de ocorrência da pandemia do Covid-19 no ano e dummy para representar se o aeroporto se encontrava privatizado no ano, pós processo de concessão.

Tabela 1: Formato do banco de dados e variáveis utilizadas em cada etapa da metodologia

Etapa do Trabalho	***Formato do Banco de Dados***	***Variáveis***
Etapa 1: Análise Envoltória de Dados (DEA)	Dados em Recortes Anuais	Oferta em ASK (*ANAC*) Área do terminal de passageiros (*ANAC / INFRAERO / administração dos aeroportos*) Comprimento total de pistas (*SAC*) Movimentação de passageiros (*ANAC*) Número de decolagens (*ANAC*)
Etapa 2: Regressão Tobit	Painel de Dados	Eficiência Casos de COVID-19 (MS) PIB per-capita (*IBGE*) Área do terminal de passageiros (*SAC / INFRAERO / administração dos aeroportos*) Comprimento total de pistas (*SAC*) Movimentação de passageiros (*ANAC*) Dummy "pandemia" (*MS*) Dummy "concessões" (*ANAC*)

3.1. Modelagem em duas etapas

Considerando a composição do banco de dados dos aeroportos selecionados, a primeira etapa a ser desenvolvida consiste na aplicação de DEA para os dados de inputs e outputs listados acima, aplicados nos modelos em cortes transversais anuais. Com esses dados, serão desenvolvidas modelagens de DEA-CCR orientado a inputs, DEA-CCR orientado a outputs, DEA-BCC orientado a *inputs* e DEA-CCR orientado a *outputs*, de forma que os resultados possam ser comparados entre si. As

modelagens foram realizadas com a utilização do *software MaxDEA 8 Basic*.

Tabela 2: Dados utilizados nos DEA's modelados, como inputs e outputs.

inputs	*outputs*
Oferta em ASK (*ANAC*) Área do terminal de passageiros (*ANAC / INFRAERO / administração dos aeroportos*) Comprimento total de pistas (*SAC*)	Movimentação de passageiros (*ANAC*) Número de decolagens (*ANAC*)

Para a segunda etapa da metodologia proposta, foram utilizados os valores de eficiência obtidos no DEA-BCC orientado a outputs da primeira etapa como variáveis dependentes dos modelos de regressão tobit desenvolvidos, vez que os resultados do modelo são obtidos considerando retornos de escala variáveis, e com isso um comportamento mais próximo da realidade do mercado aeroportuário em geral. Foram desenvolvidos, nesta fase, 3 modelos de regressão *tobit*, considerando combinações distintas de variáveis livres: (1) utilização das *dummies* "concessões" e "pandemia", sem utilizar dados de quantidade de casos de Covid-19; (2) utilização da *dummy* "concessões" e dos dados de quantidade de casos de Covid-19, sem utilizar a *dummy* "pandemia"; e (3) utilizar os dados de quantidade de casos de Covid-19, sem utilizar nenhuma das *dummies*.

$$DEA = \alpha + \beta_1 * PIBPERCAPTA + \beta_2 * AERADOTPS + \beta_3 * COMPPISTA + \beta_4 * PAX + \beta_5 * CONCESSAODUMMY + \beta_6 * PANDEMIADUMMY \quad (1)$$

$$DEA = \alpha + \beta_1 * CASOS + \beta_2 * PIBPERCAPTA + \beta_3 * AERADOTPS + \beta_4 * COMPPISTA + \beta_5 * PAX + \beta_6 * CONCESSAODUMMY \quad (2)$$

$$DEA = \alpha + \beta_1 * CASOS + \beta_2 * PIBPERCAPTA + \beta_3 * AERADOTPS + \beta_4 * COMPPISTA + \beta_5 * PAX \quad (3)$$

Os dados de PIB per capita, área do terminal de passageiros (TPS), comprimento de pista e movimentação anual de passageiros (PAX) foram utilizados em todos os modelos de regressão tobit desenvolvidos. Os modelos distintos desta segunda etapa permitiram uma análise mais ampla dos resultados, sendo todos eles realizados através do software GRETL, que permite obtenção dos resultados necessários para as diversas análises a serem feitas sobre os modelos tobit.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DEA

A aplicação de modelos DEA-BCC orientados a outputs fornecem informações e características relevantes a respeito dos aeroportos (DMU's). Os resultados do modelo DEA-BCC orientado a output seguem apresentados na Tabela 3. Em geral, é possível identificar que, dentre os DMU's considerados, os aeroportos que participaram de rodadas de concessões ocorridas à mais tempo (Guarulhos/SP, Brasília/DF e Campinas/SP, na segunda rodada; e Galeão/RJ e Confins/MG, na terceira rodada), sem considerar o aeroporto de Guarulhos/SP, apresentaram uma redução em seus valores de eficiência nos anos seguintes à concessão; em contrapartida, os aeroportos que participaram de rodadas de concessão mais recentes (Porto Alegre/RS, Salvador/BA, Fortaleza/CE e Florianópolis/SC, quarta rodada de concessão; e Recife/PE e Maceió/AL, quinta rodada de concessão), apresentaram um comportamento mais contínuo da eficiência constatada nos anos pós concessão, indicando uma evolução e "amadurecimento" da ANAC e do Governo Federal brasileiro, com o passar dos anos e das consecutivas rodadas de concessão, na estruturação de acordos e contratos que afetem menos e contribuam mais com a eficiência operacional destes aeroportos concedidos.

Tabela 3: Resultados de scores de eficiência para os aeroportos, obtidos pelo DEA-BCC orientado a outputs, de 2010 a 2020, com resultados anuais destacados para aeroportos concedidos.

DMU's		*DEA-BCC Orientado a Outputs, Períodos em Concessão – SCORES*										
AEROPORTOS		**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**
Guarulhos/SP	**SBGR**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Congonhas/SP	**SBSP**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Brasília/DF	**SBBR**	0,95	1,00	1,00	1,00	0,91	0,90	0,79	0,73	0,74	0,68	0,97
Galeão/RJ	**SBGL**	0,68	0,71	0,75	0,72	0,70	0,68	0,65	0,64	0,59	0,54	0,54
Confins/MG	**SBCF**	0,61	0,67	0,76	0,70	0,68	0,68	0,85	0,85	0,79	0,91	0,99
Campinas/SP	**SBKP**	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,77	0,72	0,70	0,86	1,00
Recife/PE	**SBRF**	0,49	0,52	0,49	0,47	0,46	0,46	0,43	0,46	0,50	0,65	1,00
Porto Alegre/RS	**SBPA**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Salvador/BA	**SBSV**	0,54	0,62	0,62	0,57	0,56	0,48	0,48	0,50	0,47	0,43	0,53
Fortaleza/CE	**SBFZ**	0,88	0,84	0,87	0,88	0,80	0,82	0,74	0,71	0,78	0,61	0,71
Curitiba/PR	**SBCT**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Florianópolis/SC	**SBFL**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,96
Belém/PA	**SBBE**	0,54	0,55	0,61	0,61	0,60	0,56	0,52	0,50	0,44	0,47	0,66
Manaus/AM	**SBEG**	0,49	0,53	0,54	0,55	0,52	0,47	0,49	0,48	0,48	0,53	0,57
Maceió/AL	**SBMO**	0,81	0,80	0,72	0,57	0,58	0,61	0,58	0,55	0,54	0,58	0,69
São Luís/MA	**SBSL**	0,67	0,65	0,65	0,50	0,53	0,60	0,52	0,59	0,52	0,57	0,73
Campo Grande/MS	**SBCG**	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Por fim, analisando os resultados obtidos no ano de 2020, onde a pandemia do Covid-19 foi decretada em todo o mundo e afetou diretamente o mercado de aviação global, não foram identificados grandes desfalques ou mudanças na eficiência dos DMU's, seja analisando apenas o ano de 2020 ou analisando o comportamento destas eficiências ao longo dos anos anteriores em comparação ao 2020. Isso se deu devido à uma tendência de "ajuste" na infraestrutura instaurada pelos aeroportos no ano de pandemia, que tendeu a "balancear" os resultados (outputs) significativamente reduzidos no ano. O aeroporto de Confins/MG, por exemplo, reduziu o porte de sua operação de terminal e operou, durante o ano de 2020, com um terminal de passageiros de 67.600,00 m² aproximadamente, enquanto vinha operando até 2019 com 132.000,00 m², indicando uma redução de cerca de 50% nessa infraestrutura. Aliando isso a uma relevante redução no número de voos ofertados no ano (ASK) em comparação ao ano anterior, comportamento ocorrido para 100% dos aeroportos estudados, é possível identificar que houve uma compensação por parte da redução dos dados de inputs em simultâneo à redução nos resultados dos aeroportos no ano, o que gerou, para o ano de 2020, valores de eficiência razoavelmente regulares em comparação aos anos anteriores.

4.2. Modelagem em duas etapas

Para a segunda etapa da metodologia proposta pelo projeto, foram processados os três modelos tobit: (1) utilização das *dummies* "concessões" e "pandemia", sem utilizar dados de quantidade de casos de Covid-19; (2) utilização da *dummy* "concessões" e dos dados de quantidade de casos de Covid-19, sem utilizar a *dummy* "pandemia"; e (3) utilizar os dados de quantidade de casos de Covid-19, sem utilizar nenhuma das *dummies*. No modelo (1) a variável independente *dummy* "concessões" não é estatisticamente significante, portanto, já foi descartado. Em seguida, foi realizada a modelagem tobit (2) e a variável independente *dummy* "concessões" também não foi estatisticamente significante.

Por fim, foi desenvolvida a modelagem tobit (3) considerando os scores do DEA-BCC como variável dependente (Y), e levando em consideração como variáveis livres (Xi) os valores de casos anuais de Covid-19 no município dos aeroportos, PIB per capta, Área dos terminais de passageiros, comprimento de pistas, movimentação anual de passageiros e *dummy* de representação de situação de concessão dos aeroportos (1 em caso de aeroporto concedido, 0 em caso de aeroporto público). Os resultados do modelo seguem dispostos em seguida.

$$DEA = \alpha + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_3 + \beta_4 * X_4 + \beta_5 * X_5$$

No qual, Y corresponde ao θ_{BCC}, X_1 são os casos confirmados de COVID, X_2 é o PIB *per capita*, X_3 é a área do TPS, X_4 são os comprimentos de pista, X_5 é o número de passageiros por anos, α é uma constante do modelo e βi são os coeficientes.

Tabela 8: Resultados do modelo tobit (3).

Modelo tobit (iii)						
VARIÁVEL		***COEFICIENTE***	***ERRO PADRÃO***	***z***	***p-VALOR***	
constante	α	0,784437	0,0456592	17,18	<0,0001	***
CASOS	β_1	8,42257e-07	3,46362e-07	2,432	0,0150	**
PIBPERCAPTA	β_2	1,03513e-06	4,68202e-07	2,211	0,0270	**
AREADOTPS	β_3	−6,92497e-07	2,44259e-07	−2,835	0,0046	***
COMPPISTA	β_4	−3,08015e-05	1,27172e-05	−2,422	0,0154	**
PAX	β_5	2,38833e-08	3,65998e-09	6,526	<0,0001	***
Qui-quadrado (5)		56,18435				
Log da verossimilhança		54,66470				
Critério de Schwarz		−72,71164				
p-valor		7,45e-11				
Critério de Akaike		−95,32940				
Critério Hannan-Quinn		−86,16467				
Fatores de Inflacionamento da Variância (VIF)						
CASOS		1,067				
PIBPERCAPTA		1,073				
AREADOTPS		2,971				
COMPPISTA		2,091				
PAX		2,564				

** nível de significância = 10%*
*** nível de significância = 5%*
**** nível de significância = 1%*

Assim como os modelos tobit (1) e (2), as variáveis "área do terminal de passageiros", "comprimento de pista" e a "movimentação anual de passageiros" apresentaram p-valores dentro dos limites de significância, indicando sua relevância estatística para o modelo. Em adição, as variáveis anteriormente utilizadas como inputs também apresentaram coeficiente negativo (área do terminal de passageiros e comprimento de pista), enquanto a variável utilizada como output também apresentou coeficiente positivo (movimentação anual de passageiros). A variável PIB per capta manteve o mesmo "comportamento" verificado nos modelos (1) e (2), com p-valor também preciso e indicando sua significância estatística, e com coeficiente positivo, indicando que, quanto maior for o PIB per capita do município do aeroporto em questão, haverá uma tendência de maior eficiência operacional deste aeroporto em si.

Em adição, assim como verificado no modelo (2), a variável de representação da quantidade de casos de Covid-19 nos municípios dos aeroportos, apresentou-se como estatisticamente significante para o modelo, possuindo p-valor dentro do intervalo de significância, e, assim como verificado para esta mesma variável em (2), e com a dummy "pandemia" no modelo (1), apresentou coeficiente com sinais surpreendentemente positivos, reforçando a indicação de necessidade de estudos adicionais para verificação e análise mais profunda dos impactos da pandemia nas operações aeroportuárias em geral.

Por fim, aplicando o teste VIF nas variáveis do modelo, não é verificado nenhum problema de multicolinearidade entre as variáveis, assim como verificado para os modelos (1) e (2), tendo todas elas valores inferiores a 10,0 para o teste.

5. CONCLUSÃO

A revisão da literatura, inicialmente em relação aos aspectos históricos e fundamentais do setor aéreo e aeroportuário em geral, no Brasil e no mundo, seguido da análise das metodologias possíveis e consolidadas na literatura para aplicação e estudo proposto inicialmente, permitiram a escolha de uma metodologia robusta, abrangente e essencialmente útil, sendo extremamente pertinentes para obtenção e interpretação dos resultados alcançados.

A análise dos resultados obtidos na primeira etapa permitiu a obtenção de informações a respeito de ambos aeroportos e metodologias DEA aplicadas. Foi possível identificar aeroportos de referência no mercado aeroportuário brasileiro, aeroportos sinalizados como pouco eficientes no período analisado, bem como a evolução, positiva, negativa ou de comportamento mais contínuo, dos aeroportos (DMU's ao longo dos 11 anos analisados).

Considerando o método DEA aplicado, apenas os aeroportos de Congonhas/SP e Curitiba/PR se mostraram eficientes ao longo dos 11 anos de estudo. Analisando os resultados do DEA-BCC orientado a outputs, método DEA utilizado na regressão tobit da 2ª etapa da metodologia, os aeroportos de Guarulhos/SP, Congonhas/SP, Porto Alegre/RS, Curitiba/PR e Campo Grande/MS se mostraram eficientes, apresentando volumes de movimentação de passageiros bastante distintos e servindo de benchmark de ações administrativas e operacionais tomadas. Os aeroportos de Brasília/DF e Galeão/RJ permitiram verificar a influência de incrementos na infraestrutura na eficiência atestada pelos métodos DEA, nos anos que sucedem o incremento em si. Em contraposição à mudança "abrupta" nas condições de infraestrutura destes aeroportos, quando concluída uma reforma e disponibilizada uma grande área adicional de terminal de passageiros, o comportamento dos resultados operacionais e financeiros deste aeroporto, como DMU, tende a assumir uma tendência mais paulatina de crescimento ao longo do tempo, indicando a necessidade de realização detalhada das estimativas de demandas destes aeroportos, bem como analisar a capacidade de absorção dos impactos imediatos deste eventual incremento.

A análise dos resultados dos DEA no aspecto das concessões, permitiu concluir uma tendência de melhoria e evolução nos contratos e acordos firmados nas rodadas de concessão, indicando uma tendência de que as próximas concessões influenciarão de forma mais positiva os aeroportos cedidos, em comparação aos aeroportos já concedidos até então. Esta tendencia de evolução nos processos de concessões aeroportuárias, bem como do impacto destas na eficiência dos aeroportos em si, também foi pontuada por Toledo et al (2021), indicando a coesão do estudo com a literatura existente.

Em relação à análise dos resultados, no aspecto dos impactos da pandemia do Covid-19 na eficiência dos aeroportos, vale ressaltar que, apesar de não ter havido evidências de impacto direto da pandemia nos valores relativos de eficiência destes aeroportos, os relatos e dados apontados pelos órgãos reguladores, empresas aéreas e até mesmo os próprios aeroportos, indicam uma acentuada e grave influência negativa da pandemia e suas medidas restritivas na operação e nos resultados financeiros destas organizações, indicando a necessidade de realização de mais estudos, de forma complementar e com metodologia diversa, para análise e mensuração destes impactos negativos.

Em relação aos resultados obtidos na segunda etapa, foi possível identificar alto grau de coesão dentre os resultados obtidos nos três modelos tobit. Em todos os três, as variáveis utilizadas anteriormente no DEA da primeira etapa se mostraram estatisticamente significantes, e com coeficientes com valores e sinais condizentes com a literatura. A variável "PIB per capita", presente em todos os três modelos tobit, também se mostrou estatisticamente relevante em todas, e com coeficientes condizentes com a literatura analisada e com o entendimento prévio da realidade: maior PIB per capita da população do município dos aeroportos tendem a influenciar positivamente nos resultados operacionais destes aeroportos, e, portanto, influenciar também na eficiência relativa destes aeroportos.

A dummy “concessão”, que representa aeroportos em operação privatizada nos anos, se mostrou estatisticamente insignificante nos modelos de regressão, resultado também condizente com a literatura, e atestado nos dois modelos tobit em que a variável foi utilizada neste projeto (modelos (1) e (2)), reforçando a coesão dos resultados obtidos nas diferentes modelagens. Mesmo as variáveis “pandemia” (dummy) e “casos de Covid-19”, que representam implicitamente o mesmo evento global de influência no mercado aeroportuário, apresentaram resultados coesos, nas diferentes combinações de variáveis dos modelos tobit aplicados. E, em todos eles, foram aplicados testes VIF, que não indicaram nenhum problema de multicolinearidade, em nenhum dos modelos.

Por fim, foi realizada uma análise geral e combinada dos resultados obtidos, principalmente em relação ao objetivo de analisar os impactos da pandemia do Covid-19 nas operações aeroportuárias do Brasil. Além dos resultados do DEA aplicado, foi verificado, na regressão tobit da segunda etapa da metodologia, que a *dummy* “concessão” e a variável de casos de Covid-19 apresentaram coeficientes positivos nos modelos gerados, indicando uma eventual “influência positiva” da pandemia na eficiência destes aeroportos, o que não condiz com a realidade. Para análises mais abrangentes e sob aspectos diversos da gestão aeroportuária em geral, um bom caminho a ser seguido é através da utilização de metodologias e bancos de dados de aspecto econométrico sobre os aeroportos no período, de forma que seja possível analisar consequências e resultados financeiros em geral, e a influência da pandemia nestes índices.

Outra opção de estudo complementar é realizar estudo através de utilização “central” da variável “ASK”, com ênfase nas companhias aéreas; analisando os resultados obtidos neste projeto, foi possível identificar que esses dados influenciaram os resultados de eficiência no ano da pandemia, de forma a “balancear” a queda nos resultados do ano sem que houvesse desfalque nos valores de eficiência calculados, o que, por seu aspecto inesperado, indica a importância de estudos mais aprofundados sobre a variável, seu comportamento, os fatores que as influencia e quais outras características dos aeroportos ela pode influenciar.

REFERÊNCIAS

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. *Dados e Estatísticas*. Brasil, 2020, ANAC. Disponível em: < https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas >. Acesso em: 11 de fev. de 2022.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil.. *Dados abertos*. Brasil, 2022, ANAC. Disponível em: < https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/ ppli-de-atuacao/todos-os-dados-abertos >. Acesso em: 14 de jan. 2022.

Banker, Rajiv D.; Natarajan, Ram. “*Evaluating Contextual Variables Affecting Productivity Using Data Envelopment Analysis*”. Operations Research, vol. 56, no 1, fevereiro de 2008, p. 48–58. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1287/opre.1070.0460.

Casa Civil. “*Ao inaugurar terminal em Brasília, Dilma comemora ampliação dos aeroportos brasileiros*.”. Governo Federal, Casa Civil, Brasil, 2014. Disponível em: < https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2014/04/ao-inaugurar-terminal-em-brasilia-dilma-comemora-ampliacao-dos-aeroportos-brasileiros >. Acessado em 14 de jan. de 2022.

Cavaignac, Laurent; Petiot; Romain. “*A Quarter Century of Data Envelopment Analysis Applied to the Transport Sector: A Bibliometric Analysis*”. Socio-Economic Planning Sciences, vol. 57, março de 2017, p. 84–96. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.11.003.

CIA – Central Intelligence Agency. *Relação de quantidades de aeródromos por país. Governo Federal,* Agência Central de Inteligência, Estados Unidos, 2022. Disponível em: < https://www.cia.gov/the-world-

factbook/field/airports/country-comparison >. Acessado em 15 de jan. de 2022.

Cooper, William W.; Seiford, Lawrence M; Tone, Kaoru. "*Data Envelopment Analysis - A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*" Kluwer Academics Publisher, 2007.

Da Rocha, Luis E. C. "*Structural evolution of the Brazilian airport network*". Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, vol. 2009, no 04, abril de 2009, p. P04020. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1088/1742-5468/2009/04/P04020.

Falcão, Viviane Adriano; da Silva, Francisco Gildemir Ferreira; de Oliveira, Francisco Heber Lacerda; Negri, Nathane Ana Rosa; de Andrade, Maurício Oliveira; Brasileiro, Anísio; Eller, Rogéria de Arantes Gomes; Macário, Rosário. "*Scientific Investigations in Air Transport about Brazil: A Bibliometric Review*". Case Studies on Transport Policy, vol. 9, no 4, dezembro de 2021, p. 1912–21. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.10.012.

HÓRUS – Sac Minfra. Gerencial, *Módulo de Informações Gerenciais. Governo Federal*, Ministério da Infraestrutura, Secretaria Nacional de Aviação Civil, Brasil, 2022. Disponível em: < https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/?auth=s#Principal>. Acessado em 13 de fev.. de 2022.

IATA – International Air Transport Association. *Annual Reviews. 75th Annual General Meeting*, Seoul, Jun. de 2019, IATA. Disponível em: <https://www.iata.org/en/publications/annual-review/>. Acessado em 13 de fev. de 2022.>

ICAO - International Civil Aviation Organization. *Annual Reports of the Council.* Disponível em: < https://www.icao.int/publications/pages/annual-reports.aspx >. Acesso em: 14 de jan. 2022.

INFRAERO. *Dados sobre aeroportos públicos brasileiros*. Disponível em: < https://www4.infraero.gov.br/ >. Acessado em 13 de fev. de 2022.

Marazzo, Marcial; Scherre, Rafael; Fernandes, Elton. "*Air Transport Demand and Economic Growth in Brazil: A Time Series Analysis*". Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 46, no 2, março de 2010, p. 261–69. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.08.008.

MaxDEA 8 Basic. *Software*, 2021. Disponível em: < http://maxdea.com/MaxDEA.html >. Acessado em: 10 de out. de 2021.

MS – Ministério da Saúde. *Dados e Informações sobre a pandemia da Covid-19.* Governo Federal, Ministério da Saúde, Brasil. Disponível em: < https://covid.saude.gov.br/ >. Acessado em 14 de jan. de 2022.

Nakamura, Hiroki; Managi, Shunsuke. "*Airport Risk of Importation and Exportation of the COVID-19 Pandemic*". Transport Policy, vol. 96, setembro de 2020, p. 40–47. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.06.018.

OMS – Organização Mundial da Saúde. *Informações sobre a Covid-19*. OMS, 2022. Disponível em: < https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019 >. Acesso em: 14 de jan. 2022.

Resende, Caio Cordeiro. *Avaliando o impacto da política de privatização de aeroportos brasileira: uma abordagem por controle sintético.* Prêmio SEPLAN de Monografias, 2º lugar, 2017.

Toledo, Fernanda Silva; Falcão, Viviane Adriano; Camioto, Flávia de Castro; da Silva, Paulo Afonso Lopes. "*Does privatization make Brazilian airports more efficient?*" TRANSPORTES, agosto de 2021. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2304.

ANALYSIS AND PREDICTION OF AIRSPACE AVAILABILITY FOR URBAN AIR MOBILITY OPERATIONS IN THE SAO PAULO METROPOLITAN REGION

João Vitor Turchetti Ribeiro*, Mayara Condé Rocha Murça
Aeronautics Institute of Technology

* joaojvtr@ita.br

PAPER ID: SIT207

ABSTRACT

Urban Air Mobility (UAM) is an emerging form of transportation that is expected to introduce novel flight networks into already busy and complex airspace surrounding major cities and metropolitan regions. This paper studies the dynamics of urban airspace use by conventional aircraft over the Sao Paulo metropolitan region in order to identify and predict which airspace volumes are least constrained and best accessible for future UAM flights. Using historical flight tracking data, clustering analysis is first performed to identify departure and arrival trajectory patterns flown by conventional traffic at the two major airports – Sao Paulo/Guarulhos International airport and Sao Paulo/Congonhas airport. We then create a probabilistic model of the spatiotemporal distribution of air traffic under known meteorological conditions, which enables the prediction of active procedures, their spatial confidence regions and the resulting airspace availability for UAM in response to dynamic operational factors. The data-based approach allowed for a high-fidelity characterization of the Sao Paulo urban airspace use patterns as well as for accurate predictions of the available airspace for UAM, bringing novel insights and capabilities in support of dynamic and efficient urban airspace management.

Keywords: Urban Air Mobility, Air Traffic Management, Clustering, Probabilistic Model.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Atech, an Embraer group's company, and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the support.

1. INTRODUCTION

Everyday, millions of people around the world have the basic need of moving around metropolises due to various reasons – commuting to work, going to the airport, visiting a relative etc. – some of them traveling dozens of kilometers through clogged roads to reach their destination and spending more time than desired. A research performed by the Brazilian Institute of Public Opinion and Statistics (Ibope et al., 2014) estimated that, in Sao Paulo, the average citizen spends up to 167 minutes daily in road traffic while commuting. The problem of urban mobility is not new, and many systems have been proposed as alternatives to classic road transportation, such as subway and surface railways, electric light buses and others. Moving around *above* the city, through the air, is an idea that has always existed in popular imaginary, but the only way to do it nowadays is by helicopter, which is inaccessible for most part of the population. Emerging Urban Air Mobility (UAM) is a new concept that is coming to fulfill the gap of urban air transportation, and has the potential of reducing costs of commuting through the air and reducing road congestion.

UAM is based on Electric Vertical Takeoff and Landing vehicles (eVTOL), a novel type of aircraft that has been developed by different companies for the last few years. A 74 billion dollar UAM market is expected to rise in the next decade, with up to 23,000 eVTOL vehicles operating globally (EmbraerX et al., 2019). The importance of this new urban mobility system is highlighted by the heavy road traffic currently observed in many big metropolises and by the increasing need of people for faster mobility0. Hence, the introduction and development of UAM may lead to great benefits, especially in the scope of personal time management (FAA, 2020).

UAM is expected to introduce new complex flight networks in low-altitude airspace over big cities, especially below 3,000 feet Above Ground Level (AGL) (Vascik et al., 2019). Hence, re-architecting the urban airspace will be essential to provide a safe environment in which these novel operations can harmoniously cohabit with current flights. This challenge brings a new level of complexity considering that the urban airspace is already structured in an adequate and manageable fashion, which is well-perceived as safe by the population in general.

Currently, the airspace over cities is designed to procedurally segregate aircraft, assuring proper vertical and lateral separation at all times. In large metropolitan regions served by multiple airports, such as Sao Paulo, the problem of organizing traffic becomes even more complex, since it is necessary to prevent conflicts between the active procedures of multiple closely located airports. This usually translates into longer arrival and departure procedures for each airport, which ultimately leads to delays and lower fuel efficiency. Hence, the addition of new vehicles, UAM for instance, to these already busy types of airspace becomes a problem, which is the central theme of this paper.

The purpose of this work is to offer a data-based approach for modeling the current patterns of urban airspace use by traditional aviation in order to identify and predict the airspace volumes that are least constrained and therefore best accessible for UAM flights. We select as case study the Sao Paulo's urban airspace, the largest metropolitan region in Latin America. Nevertheless, the methodology proposed in section 3. is designed to be generally applicable in any other desired context.

2. RELATED LITERATURE

The topic of urban airspace design and management for integration of emerging UAM operations has been subject of numerous studies. Different authors have addressed the matter using different techniques, from geometric approaches supported on published procedures and topographic data, to flight trajectory data analytics based on the application of machine learning algorithms on Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) data.

Vascik et al. (2019) developed a geometric framework that used only static, publicly available information, evaluated in multiple scenarios. The authors defined four ConOps scenarios and studied seven airspace constructs, as terrain clear-

ance, airports airspace clearance, special flight rules areas, and others. Then, geometrically combining all constructs, they were able to estimate the airspace availability for UAM under their specific hypotheses and scenarios.

Regarding data-driven approaches, most of them resort to flight tracking data gathered from ADS-B networks or similar (Vascik & Hansman, 2019), (Murça, 2021), (Vascik & Hansman, 2019), (Eerland et al., 2016), (Eerland et al., 2017), (Murça et al., 2018), (Gariel et al., 2011), (Eckstein, 2009), (Olive & Morio, 2018), (Murça et al., 2020), (Olive et al., 2021).

Vascik & Hansman (2019) addressed the urban airspace availability analysis problem using a statistical approach. The authors used Airport Surface Detection Equipment - Model X (ASDE-X) data rather than ADS-B in order to gather not only commercial flight data, but also rotary-wing and general aviation flight data. They suggested the application of containment boundaries around multiple observed trajectories of traffic departing and arriving at some of the largest airports in the U.S. Then, they clustered the flight trajectories and mapped volumes of airspace around each cluster centroid that were occupied by a certain percentile of the flights of interest.

Murça (2021) addressed the problem of identifying available volumes of urban airspace for UAM operations using ADS-B data of arriving and departing traffic at Congonhas airport, the most central airport in Sao Paulo, Brazil. The author also analyzed the impact of adopting different lateral separation buffers (ATC-assumed minimum lateral separation) to procedurally separate UAM from conventional traffic, and the differences between integrating UAM dynamically or statically. The author found that using a reduced lateral separation criterion increased airspace availability by up to 87%.

Gaussian-based probabilistic models have been used to study the air traffic behavior. Eerland et al. (2016) investigated the dispersion of flight trajectories using Gaussian Processes; a similar objective to Vascik & Hansman (2019). Eerland et al. (2017) used the same model to quantify the air traffic complexity inside an specific airspace volume, aiming to provide a comprehensive map to improve the visualization of the airspace complexity. Both authors performed flight trajectory clustering using DBSCAN prior to inputting its results in the probabilistic model.

Addressing the matter of flight trajectory clustering, several authors have tried different techniques to properly identify spatial and/or temporal patterns from flight tracking data. Hierarchical algorithms, for example, use the distance between the observed points of a dataset to build the clusters and have been explored by Rehm (2010) and Delahaye et al. (2017). These algorithms may be useful to identify trajectory clusters within small datasets, since it is easy to implement. Some of them are biased to globular clusters and hence not suitable for flight trajectory analysis, while others do not work well with noise (Carvalho et al., 2021). This may be a problem in airspace characterized by the occurrence of too many holding patterns or ATC vectoring.

Many authors have used density-based clustering algorithms, such as DBSCAN (Gariel et al., 2011), (Liu et al., 2017), (Murça et al., 2018), (Murça et al., 2020), (Murça, 2021), (Eerland et al., 2016), (Olive & Morio, 2018), (Olive et al., 2021). DBSCAN works well with noise and outliers and is not limited to globular shapes, being able to discover trajectory clusters of any form. In a busy environment as a metroplex‘s terminal area (TMA), tactical air traffic flow management may generate non-conforming trajectory behavior typically regarded as noise (ATC vectoring, holding patterns, go around procedures and so on). The algorithm can also deliver satisfactory results without the need for the user to inform the number of clusters beforehand. Thus, it is safe to assume that DBSCAN is a powerful tool for flight trajectory data analytics.

Review of the literature shows that, while several studies have succeeded to identify spatial and temporal patterns from flight trajectory data, few have attempted to leverage that knowledge to predict the traffic behavior. That line of research is where this paper builds itself upon, aiming to propose data-driven models to identify and predict urban airspace availability for UAM operations, based on a comprehensive set of external features that are found to impact the air traffic distribution.

3. METHODOLOGY

We developed a data-driven approach to identify and predict urban airspace availability for UAM operations. The methodology is based on gathering flight tracking data and properly processing it, performing a trajectory clustering analysis to identify traffic patterns, then estimating a probabilistic model to forecast spatial confidence regions for the traffic patterns and the resulting airspace availability, which are displayed using map visualizations. The methodology is summarized in Figure 1 and detailed in this section.

3.1. Region of interest

Our study case is the Sao Paulo metropolitan region, especially the urban airspace surrounding Congonhas (CGH) and Guarulhos (GRU), hence our Region of Interest (ROI) is a part of the Sao Paulo TMA. Also, since UAM is expected to fly at low altitudes – between 400 ft and 1,500 ft AGL (EmbraerX, 2020), and maximum 3,000 ft AGL (Vascik et al., 2019) – we define 3,000 ft as the superior limit of the ROI, which corresponds to an altitude a little higher than 5,500 ft MSL (above Mean Sea Level) for Sao Paulo.

3.2. Data

The emergence of ADS-B turned incredibly large amounts of flight tracking data easily accessible to air traffic managers, flight planners, researchers and others. ADS-B is a surveillance technology incorporated into regular transponder units in which an aircraft automatically broadcasts its navigation data (speed, altitude, heading etc) in regular intervals. This work uses ADS-B data gathered inside the Sao Paulo TMA to map arrival and departure flows at CGH and GRU and understand the behavior of commercial air traffic inside the urban airspace.

In this work, we relied on flight tracking data from the OpenSky Network (Schäfer et al., 2014) gathered for the whole month of November 2019 using the OpenSky's REST API. The database consists of almost 1 million observations, corresponding to approximately 15,000 flights. It contains, among other attributes, information about aircraft callsigns, destination and origin airports and, most importantly, trajectory data (latitude, longitude and altitude) for each timestamp. The acquisition rate is about 6 per minute.

Data preprocessing was conducted to filter the observations inside the terminal area: all trajectory observations not further than 40 nautical miles from the airport of operation and not higher than 19,500 feet were filtered, and to eliminate flights with incomplete or noisy trajectory data based on sanity checks. Figure 2 presents a visualization of the filtered flight tracking data, separately for CGH and GRU, respectively.

In addition, each object (line) of that dataset is a single observation of some flight at a single timestamp, but, before clustering, it was necessary to change its structure. We restructured the dataset to represent each flight with a single line, given by a time series of trajectory data (latitude, longitude and altitude). Moreover, as each different flight had a different number of observations inside the terminal area, it was necessary to resample the trajectory data to represent each object with the same number of attributes, making the dataset suitable for the clustering step.

The probabilistic model needs meteorological and other external inputs in order to learn how air traffic is distributed depending upon weather and different airport runway configurations. We used meteorological information to forecast active runway configurations and procedures. The meteorological data were obtained from historical METAR messages for CGH and GRU, which are available via REDEMET's API (Redemet, 2022). METARs are standardized messages issued by local aviation authorities to inform aircraft of an airport's actual meteorological situation, including wind and visibility characteristics. Being fed with this information, the probabilistic model is capable of learning the spatial distribution of traffic given the meteorological condition.

3.3. Trajectory clustering analysis

A trajectory clustering analysis is first performed to identify air traffic patterns in the terminal airspace. A busy TMA is typically highly structured with arrival and departure procedures

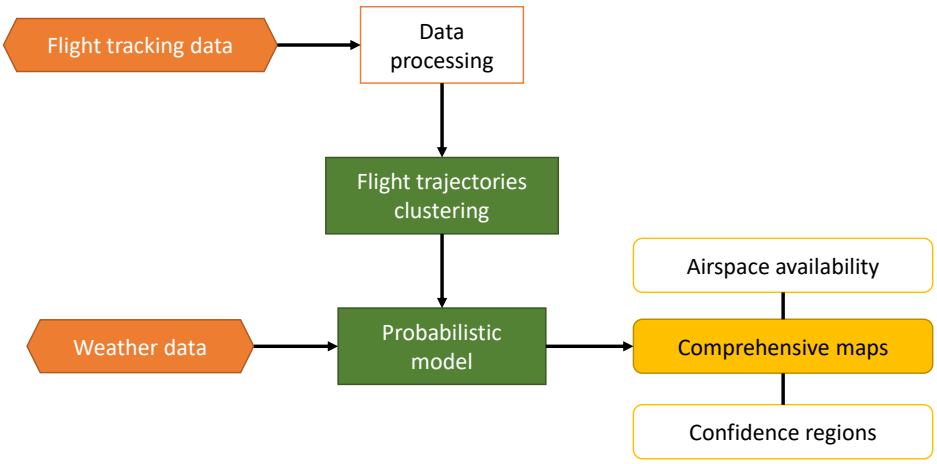


Figure 1 Summary of the methodology.

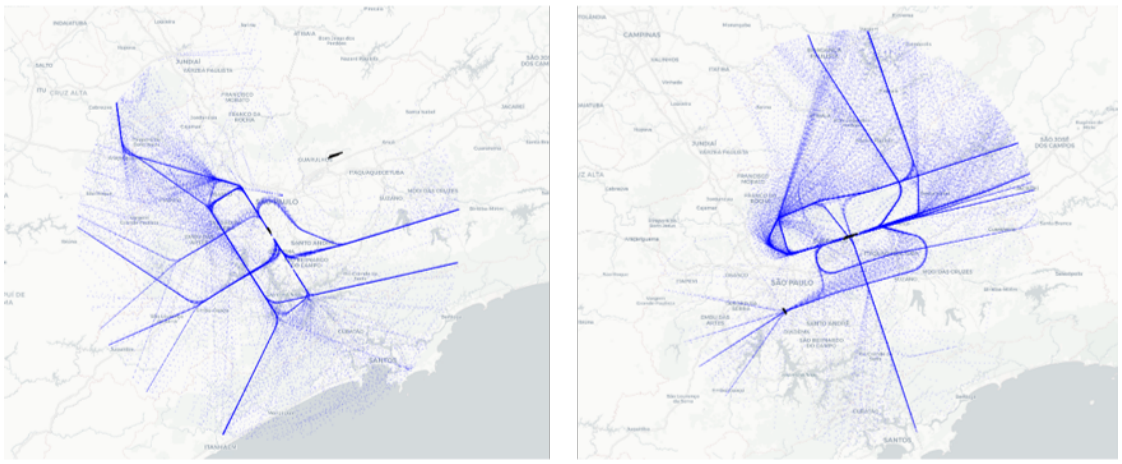


Figure 2 Filtered flight tracking data inside Sao Paulo TMA - CGH (left) and GRU (right).

that allow aircraft to transition between the airport and the en route airspace safely. The high density of operations usually makes actual trajectories subject to deviations from the planned flight procedures, since ATC vectoring, holding patterns and direct heading clearances are typically used for tactical air traffic flow management. The standard routes and the natural variability in their execution produce the core underlying patterns that we seek to identify with the trajectory clustering analysis. Yet, these ATC control actions may also create noise trajectories that deviate significantly from nominal traffic patterns.

Therefore, we use the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) algorithm to cluster the trajectory data. DBSCAN enables the identification of the core trajectory patterns in the presence of abnormal trajectory profiles. Besides the ability to handle noise, DBSCAN deals well with non-convex clusters, does not require the number of clusters to be defined *a priori* and has been successfully used for clustering trajectory datasets in various domains.

3.4. Probabilistic air traffic model

The purpose of building a probabilistic model is to learn the spatiotemporal distribution of air traffic and to make predictions based on external inputs, such as meteorology. We model the trajectory patterns identified in the clustering phase with a Gaussian Mixture Model (GMM) (McLachlan & Basford, 1988). In other words, we assume that the spatial air traffic distribution within each cluster can be modeled with a Gaussian density and that the spatial distribution of air traffic in the TMA is given by a weighted sum of Gaussian densities. The GMM is mathematically defined as follows:

$$p(X) = \sum_{y=1}^{K} \pi_y p(X/Y=y) = \sum_{y=1}^{K} \pi_y \mathcal{N}(X;\mu_y,\Sigma_y) \quad (1)$$

X is a multivariate random variable that represents the aircraft trajectory and a specific weather condition; it results from concatenating two vectors: X_T, which contains the trajectory information, and X_W, which contains the weather information;

π are the mixture weights;

K is the number of clusters (patterns, Gaussian components);

μ is the mean vector of the Gaussian density that models the y^{th} procedure;

Σ_y is the covariance matrix of the Gaussian density that models the y^{th} procedure.

Fundamentally, Gaussian component weights cannot be individually greater than one and sum up to one:

$$0 \leq \pi_y \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{y=1}^{K} \pi_y = 1 \quad (3)$$

After the model estimation, we apply it to make predictions of active procedures, their spatial traffic distribution and the resulting airspace availability given the meteorological conditions. This is accomplished by the computation of marginal and conditional densities. Eqs. 4 and 5 express the probability of occurrence of the y^{th} procedure given known weather conditions. Bayes's theorem is used to calculate that from the marginal distribution of weather conditions X_W given the y^{th} procedure, which is Gaussian with mean vector $\mu_{y,W}$ and covariance matrix $\Sigma_{y,WW}$, as in Eq. 6. This allows us to express the probability of occurrence of the y^{th} procedure given input weather conditions as in Eq. 7.

$$p(Y=y/X_W) = \frac{p(X_W/Y=y)p(Y=y)}{p(X_W)} \quad (4)$$

$$p(Y=y/X_W) = \frac{\pi_y p(X_W/Y=y)}{\sum_{i=1}^{K} \pi_i p(X_W/Y=i)} \quad (5)$$

$$X_W/Y=y \sim \mathcal{N}(\mu_{y,W},\Sigma_{y,WW}) \quad (6)$$

$$\pi_y^* = \frac{\pi_y \mathcal{N}(X_W;\mu_{y,W},\Sigma_{y,WW})}{\sum_{i=1}^{K} \pi_i \mathcal{N}(X_W;\mu_{i,W},\Sigma_{i,WW})} \quad (7)$$

To model the spatial distribution of air traffic for a known weather condition, we need to compute the conditional probability distribution of aircraft trajectories X_T given input meteorological conditions X_W for the y^{th} procedure. Bishop & Nasrabadi (2006) shows that this probability distribution is Gaussian with mean vector μ_y^* and covariance matrix Σ_y^*, as expressed by Eqs. 8 to 12.

$$X_T/X_W, Y=y \sim \mathcal{N}(\mu_y*, \Sigma_y^*) \quad (8)$$

$$\mu_y^* = \mu_{y,T} + \Sigma_{y,TW}\Sigma_{y,WW}^{-1}(X_W - \mu_{y,W}) \quad (9)$$

$$\Sigma_y^* = \Sigma_{y,TT} - \Sigma_{y,TW}\Sigma_{y,WW}^{-1}\Sigma_{y,WT} \quad (10)$$

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} \mu_{y,W} \\ \mu_{y,T} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} \Sigma_{y,WW} & \Sigma_{y,WT} \\ \Sigma_{y,TW} & \Sigma_{y,TT} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Finally, we can use the marginal and conditional densities to forecast active procedures and their spatial confidence regions. Eq. 13 defines the set S of procedures forecast to be active for a given probability threshold γ. Eq. 14 expresses the confidence region R_y of the spatial distribution of air traffic for a significance level α for each active procedure y.

$$S = \{y : \pi_y^* \geq \gamma\} \quad (13)$$

$$R_y = \{X_T : p(X_T/X_W, Y=y) = 1-\alpha\} \quad (14)$$

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Identification of traffic patterns

The flight trajectory clustering analysis with DBSCAN was performed separately for each airport and type of operation – CGH departures, CGH arrivals, GRU departures and GRU arrivals – for improved clustering performance. Table 1 presents the number of clusters identified and the percentage of data noise encountered for each flow. As an example, the clusters identified for CGH departures are displayed in Figure 3.

Table 1 Clustering results.

Flow	# clusters	Noise
CGH DEP	6	10.3%
CGH ARR	5	9.6%
GRU DEP	6	12.1%
GRU ARR	6	11.3%

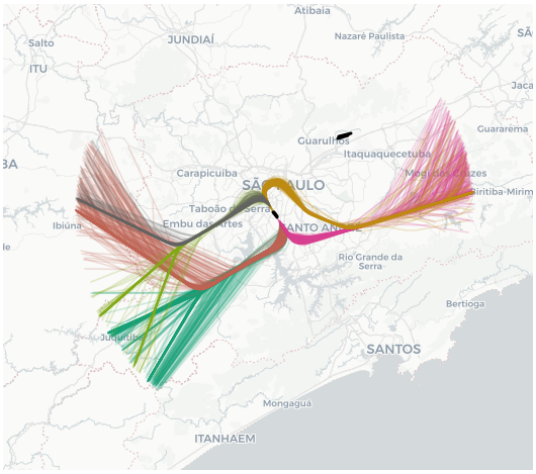


Figure 3 Clusters - CGH departures.

4.2. Air traffic spatial distribution

After the clustering analysis, a GMM was estimated for each airport and type of operation based on the traffic patterns identified. The model allowed us to examine the spatial distribution of air traffic inside each cluster. For a given altitude range, a spatial confidence region in the form of an ellipse is determined. Hence, we can find certain airspace regions where air traffic has some probability of occurring, ultimately determining a busy and unavailable portion of the urban airspace.

In this section, we present the resulting confidence regions for three levels of confidence: 90%, 95% and 99%, considering an altitude layer from Ground Level (GND) to 3,000ft AGL. In the maps displayed in Figure 4, the ellipses represent the confidence regions of each cluster for these three different confidence levels, and Figure 5 presents the results for two different altitude layers.

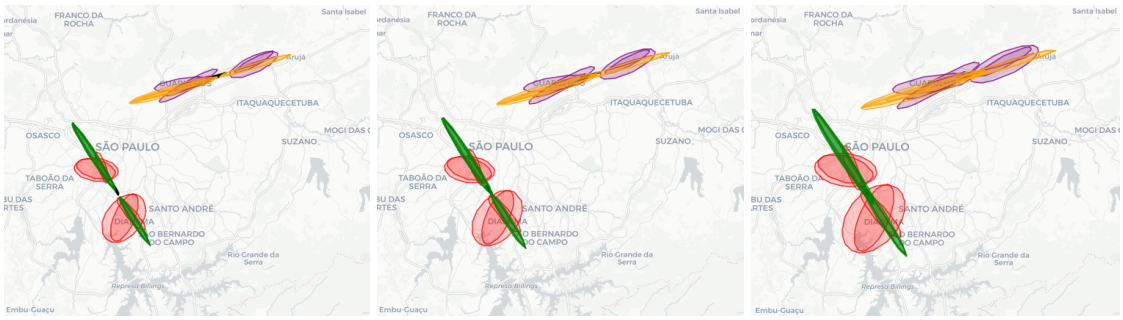
4.3. Prediction of airspace availability

Once the probabilistic model was estimated, we were able to make predictions of the urban airspace availability for any meteorological condition. As an example, Figure 6 shows the results of this prediction at a level of confidence of 95% and a probability threshold of 5% for the following conditions: marginal VFR, winds coming from the southeast at 10 knots. Results for two different altitude layers are presented: below 1,500ft AGL and below 3,000ft AGL.

The confidence regions are larger for the altitude layer below 3,000ft AGL than below 1,500ft AGL, with an exception for GRU departures, which might have been caused by the quality of the flight tracking data used. Even though this conclusion needs further and deeper investigation, it is a first step towards understanding that it will be critical to properly allocate special routes and dedicate exclusive altitude layers for UAM operations, a concept already introduced by various publications and Concepts of Operations available.

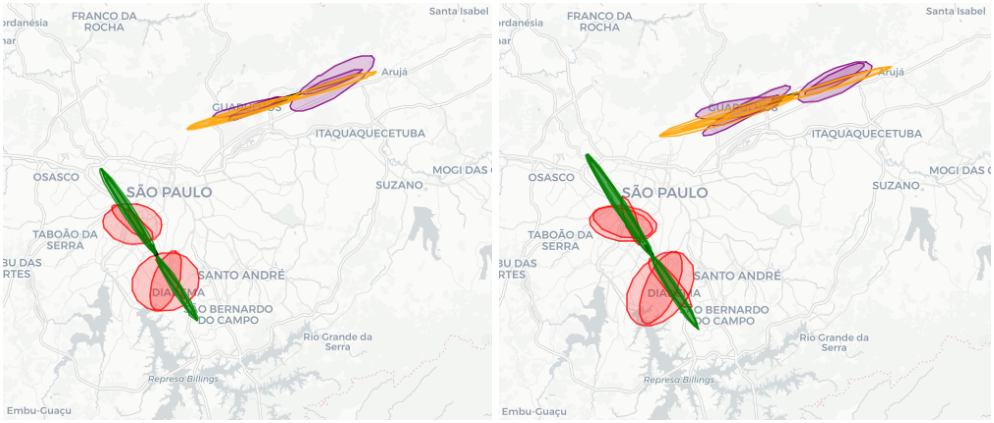
An analysis of the GMM's predictive performance was done to evaluate the quality of the model. As expressed by Eq. 13, a certain procedure is labeled as active if the probability of its occurrence is equal or greater than a threshold value γ. Thus, by testing different values for that parameter, we evaluated the sensibility and accuracy of the prediction model. The accuracy was defined by the mean of the model's success rate, measured day by day, for the test dataset (one third of the whole dataset, randomly selected). The results are displayed in Table 2.

It is evident that for a probability threshold γ of 0%, every single learned procedure would be active regardless of the input meteorological condition. By increasing the threshold to 1% and 5%, we find that the average number of predicted procedures decreases, indicating that the model is able to reasonably distinguish between active and inactive procedures and the airport runway configuration resulting from a given meteorological condition. Naturally, such prediction is not perfect, and the model's accuracy decreases with the use of higher probability thresholds. However, we observed an accuracy greater than 95% for a threshold of 5% that predicts nearly half of the patterns as active, which is very promising.



(a) Level of confidence: 90% **(b) Level of confidence: 95%** **(c) Level of confidence: 99%**

Figure 4 Confidence regions below 3,000ft AGL – CGH departures (red) and arrivals (green), and GRU departures (purple) and arrivals (orange).



(a) Below 1,500ft AGL **(b) Below 3,000ft AGL**

Figure 5 Confidence regions at 95% level of confidence.

Table 2 Model predictive performance results – 95% level of confidence.

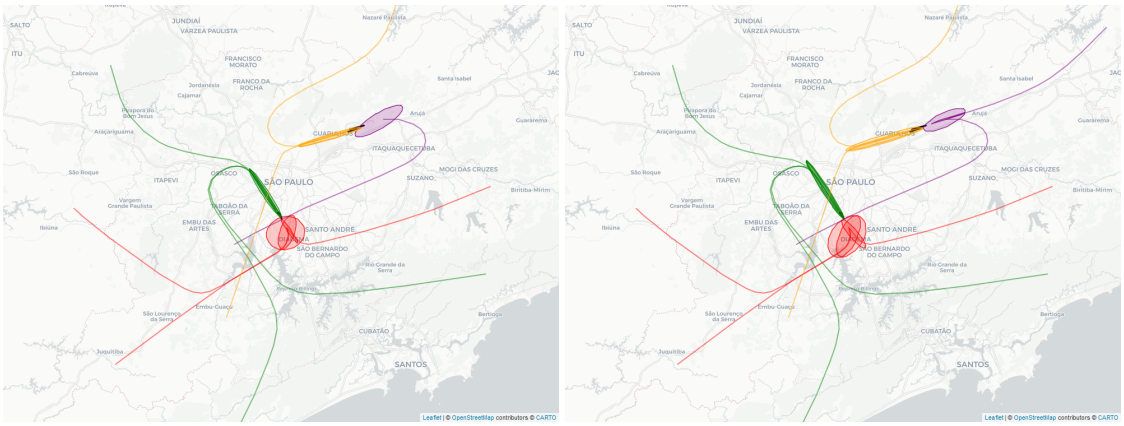
Flow	γ	# predicted active procedures (mean)	Accuracy (mean)
CGH DEP	0.00	6	100.0%
	0.01	4.7	98.0%
	0.05	3.5	96.8%
CGH ARR	0.00	5	100.0%
	0.01	3.5	98.9%
	0.05	2.7	97.8%
GRU DEP	0.00	6	100.0%
	0.01	5.1	98.8%
	0.05	3.9	98.1%
GRU ARR	0.00	6	100.0%
	0.01	4.3	98.1%
	0.05	3.2	97.4%

5. CONCLUSIONS

The application of clustering techniques followed by probabilistic analysis proved to be useful to understand multiple characteristics and the dynamics of urban airspace. Understanding how air traffic actually behaves inside urban terminal areas is of utmost importance to properly integrate UAM to existing operations.

One very evident conclusion taken from the results is that the higher the altitude the wider the dispersion of air traffic. Although this was already expected, it helps us to better understand how the TMA is actually structured, i.e. to understand at which regions – or at which distances from the airports – the traffic merges into a single path or split into many others. For example, it is notable from the maps presented that the air traffic dispersion is much wider for traffic operating at CGH than GRU.

Regardless of the airport or meteorologi-



(a) Below 1,500ft AGL **(b) Below 3,000ft AGL**

Figure 6 Example: prediction of urban airspace availability – 95% level of confidence and 5% probability threshold.

cal condition, air traffic is much more dispersed during departure than arrival. This observation is expected and coherent with the way how Instrument Flight Rules (IFR) procedures are elaborated in busy airspaces: usually, arriving aircraft supported by Instrument Landing Systems (ILS) need at least 5 to 10 NM of straight flight collinear to the runway, while departure traffic can take off and readily turn into the planned procedure. This leads us to expect that a wider region of the airspace should be unavailable for UAM on the sector dedicated for take offs.

By applying the GMM with different levels of confidence, we found that, although higher levels of confidence generated wider confidence regions, the differences in dimensions were slight. By contrast, the altitude layer where the analysis was done impacted significantly airspace availability.

Finally, our predictive model showed itself to be useful to provide better comprehension of two factors regarding airspace occupation: how widely air traffic distributes itself and how many individual procedures are being used. Since the model is capable of delivering these outputs after being fed with meteorological information, one can forecast in advance the traffic patterns most likely to be active, and hence determine the probable urban airspace availability for UAM operation. This allows for smarter and more efficient planning by both ATM agents and UAM operators.

References

Bishop, C. M. & Nasrabadi, N. M. (2006). Pattern recognition and machine learning Vol. 4, Springer,.

Carvalho, A., Faceli, K., Lorena, A., Gama, J. & Almeida, T. (2021). Inteligência artificial–uma abordagem de aprendizado de máquina, Rio de Janeiro: LTC.

Delahaye, D., Puechmorel, S., Alam, S. & Féron, E. (2017). Trajectory mathematical distance applied to airspace major flows extraction Anais do ENRI International Workshop on ATM/CNS, Springer pp. 51–66.

Eckstein, A. (2009). Automated flight track taxonomy for measuring benefits from performance based navigation Anais do 2009 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, IEEE pp. 1–12.

Eerland, W. J., Box, S. & Sóbester, A. (2016). Modeling the dispersion of aircraft trajectories using gaussian processes, Journal of Guidance, Control, and Dynamics 39(12), 2661–2672.

Eerland, W. J., Box, S., Fangohr, H. & Sóbester, A. (2017). A gaussian process based decision support tool for air traffic management Anais do 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, p. 4264.

EmbraerX, A. (2020). Urban Air Traffic Management: Concepts of Operations, EmbraerX, Airservices Australia,.

EmbraerX, Atech & L3Harris (2019). Flight Plan 2030 – an air traffic management concept for UAM,,.

FAA (2020). Concepts of Operations: Urban Air Mobility 1.0 edition, Federal Aviation Administration, NextGEN,.

Gariel, M., Srivastava, A. N. & Feron, E. (2011). Trajectory clustering and an application to airspace monitoring, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 12(4), 1511–1524.

Ibope, P. et al. (2014). Apresentação dia mundial sem carro, 2014.

Liu, Y., Hansen, M., Lovell, D. J., Chuang, C., Ball, M. O. & Gulding, J. (2017). Causal analysis of en route flight inefficiency-the us experience Anais do Twelfth USA, Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar,.

McLachlan, G. J. & Basford, K. E. (1988). Mixture models: Inference and applications to clustering Vol. 38, M. Dekker New York,.

Murça, M. C. R. (2021). Identification and prediction of urban airspace availability for emerging air mobility operations, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 131, 103274.

Murça, M. C. R., Guterres, M. X., de Oliveira, M., Szenczuk, J. B. T. & Souza, W. S. S. (2020). Characterizing the brazilian airspace structure and air traffic performance via trajectory data analytics, Journal of Air Transport Management 85, 101798.

Murça, M. C. R., Hansman, R. J., Li, L. & Ren, P. (2018). Flight trajectory data analytics for characterization of air traffic flows: A comparative analysis of terminal area operations between new york, hong kong and sao paulo, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 97, 324–347.

Olive, X. & Morio, J. (2018). Trajectory clustering of air traffic flows around airports, Aerospace Science and Technology 84, 776–781.

Olive, X., Sun, J., Murça, M. C. R. & Krauth, T. (2021). A framework to evaluate aircraft trajectory generation methods Anais do Proceedings of the 14th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, New Orleans, LA, USA, pp. 20–24.

Redemet (2022). API-REDEMET – METAR `https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/api-redemet-mensagem-metar/` Rede de Meteorologia da Aeronáutica. Online; accessed March, 2022.

Rehm, F. (2010). Clustering of flight tracks Anais do AIAA Infotech@ Aerospace 2010,.

Schäfer, M., Strohmeier, M., Lenders, V., Martinovic, I. & Wilhelm, M. (2014). Bringing up opensky: A large-scale ads-b sensor network for research Anais do IPSN-14 Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IEEE pp. 83–94.

Vascik, P. D. & Hansman, R. J. (2019). Assessing integration between emerging and conventional operations in urban airspace Anais do AIAA Aviation 2019 Forum, p. 3125.

Vascik, P. D., Cho, J., Bulusu, V. & Polishchuk, V. (2019). Geometric approach towards airspace assessment for emerging operations, Journal of Air Transportation.

PREVISÃO DE ATRASOS DE VOOS POR MACHINE LEARNING: REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E METANALISE

Hélio da Silva Queiroz Júnior*, Viviane Adriano Falcão
Federal University of Pernambuco - UFPE, Technology and Geosciences Center - CTG

*** Corresponding author e-mail address**: helio.junior@ufpe.br

PAPER ID: SIT125

RESUMO

Um problema comum em aeroportos ao redor do mundo são os atrasos em voos comerciais. A crescente demanda por modal aéreo faz com que esses atrasos sejam cada vez mais recorrentes, causando custos adicionais e exigindo ajustes constantes na gestão de voos. Definir o método mais eficaz na previsão da ocorrência desses atrasos é um tema recorrente nas buscas de operações de trânsito. Nesses estudos, a especificidade da área analisada (seja uma companhia aérea, um aeroporto ou toda a operação de um país), a complexidade da produção buscada (previsão por regressão ou classificação) ou o tamanho da base de dados utilizada requerem métodos de análise mais robustos, e o aprendizado de máquina é uma alternativa comum ao uso de métodos estatísticos clássicos. No entanto, o número de métodos de previsão que usam o princípio da aprendizagem de máquina é vasto. A divergência entre os cenários estudados atribui diferentes verificações de precisão entre as respostas obtidas nos estudos realizados. Por isso, este projeto tem como objetivo definir os métodos mais adequados de *machine learning* para estimar a ocorrência de atrasos nos aeroportos. Com base nos métodos de revisão sistemática da literatura, grupos de publicações periódicas são levantados nas principais bases de dados internacionais, a partir de grupos de palavras-chave definidas. Assim, as análises indicam que a rede de crenças profundas, a floresta aleatória, o gradiente impulsionando árvores e redes neurais recorrentes e complicadas têm uma melhor eficácia nas respostas de previsão, e o cenário ideal de análise é aqueles específicos para aeroportos ou companhias aéreas. Portanto, o tamanho dos dados, a complexidade dos cenários e as previsões buscadas tendem a obter resultados mais adequados quando são aplicados métodos mais complexos de previsão.

Palavras-chave: Atraso de voo, Previsão, Meta-análise, Machine Learning, DEA.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- Brasil (CNPq).

1. INTRODUÇÃO

Uma problemática comum nos aeroportos em todo o mundo são os atrasos de voos comerciais (WANG & WANG, 2019). A crescente demanda pelo modal aéreo faz com que estes atrasos (*delays*) sejam cada vez mais recorrentes, ocasionando custos adicionais e exigindo ajustes constantes no gerenciamento dos voos (LIU, YIN & HANSEN, 2019).

A aquisição de dados facilitada pela disponibilidade de novas e acessíveis tecnologias favorece a obtenção de informações úteis à aplicação em estudos de aviação em diversas áreas críticas, como em casos de análise de *big data*, gerenciamento de rede de transporte aéreo ou em previsão dos possíveis atrasos de voos utilizando para isso os métodos de aprendizado de máquina- *machine learning* (CHU et al, 2020).

Contudo, a complexidade dos dados do setor aéreo, aliada a diversidade dos modelos de *machine learning* para previsão formam a principal barreira na definição do cenário com maior acurácia na previsão.

Com isso, algumas barreiras são encontradas ao buscar estabelecer padrões que sirvam como base a aplicabilidade destes métodos de previsão no mercado. A área de análise, os parâmetros de influência nos atrasos, uma faixa de acurácia aceitável ou o modelo de previsão mais eficaz, compõem as esferas na determinação dos cenários adequados de estudos de previsão.

Diante disto, esta pesquisa objetiva analisar os distintos modelos de metodologias e métodos de previsão de atrasos e definir o cenário padrão de previsibilidade necessária para um modelo ser julgado razoável ou bom para tomada de decisão. Para isso, uma proposta metodológica foi desenvolvida, na qual foi realizada uma revisão bibliométrica para definir o comportamento das pesquisas sobre o tema, afim de que se levantasse as principais técnicas aplicadas, em seguida foi realizada uma metanalise para definir um valor padrão de acurácia a ser seguido pelo mercado na previsão de atrasos, para que então, fossem definidos os parâmetros e/ou métodos de *machine learning* mais eficientes para a realização de previsões de atrasos de voos.

2. METODOLOGIA

Afim de definir o cenário com a configuração mais adequada a realização de previsões utilizando *machine learning*, a presente pesquisa foi dividida em quatro etapas.

A primeira etapa é a de revisão sistemática de literatura, afim de que os principais trabalhos publicados a nível nacional e internacional pudessem ser coletados e avaliados. Para a realização desta etapa, foram consultados um dos principais periódicos (Scopus) sendo selecionados os artigos publicados em revistas com alto impacto e recentes.

A etapa seguinte é a de definição da acurácia universal dos métodos de *machine learning* utilizados nos estudos coletados. Nesta etapa foram utilizados os métodos de análise sistêmica de proporção e meta-análise por meta-regressão, afim de que fossem apontados os modelos com maior acurácia nas previsões de atraso por classificação (definição binária de resposta, em que “0” significa voo sem atraso e “1” voo atrasado) e por regressão (na qual o atraso é classificado de acordo com o tempo esperado de duração deste).

A divisão em cenários permite que a revisão sistemática por proporção e a meta-regressão associem o número de ocorrências de voos em um aeroporto com a proporção positiva de acertos do método de previsão aplicado, indicar a eficiência universal dos modelos de *machine learning* para previsão da ocorrência.

Baseado nas definições de Borenstein et al (2010), essas meta-análises, consideradas “clássica”, utilizam as proporções (não) transformadas e os erros padrão correspondentes no método de variância inversa, tendo o logit definindo o método de argumento "Inverso".

As etapas três e quatro são responsáveis por levantar os fatores de influência na acurácia obtida em cada estudo, além de selecionar o método mais eficaz para os cenários definidos, respectivamente.

A complexidade dos dados necessários, as áreas a serem abordadas, (seja aeroporto ou linha aérea numa escala universal ou com enfoque climático, foram avaliadas nestas etapas, sendo empregada a Análise Envoltória de Dados, DEA, afim de caracterizar a eficiência de cada estudo levantado.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1. Revisão Sistemática de Literatura

A partir do levantamento realizado na base Scopus utilizando os grupos de palavras-chave e strings selecionados, os artigos coletados no Grupo 01 (“Delay” AND "Air transportation" AND "prediction" AND ("Departure" OR "Arrival") OR "Airplane" OR "Airport") foram distribuídos em nuvem de palavras, Figura . Desta forma, foi possível identificar os conjuntos de palavras-chave que obtiveram o maior número de ocorrências nos estudos de previsão de atrasos em voos, além dos métodos utilizados com maior frequência.



Figura 1: Núvem de palavras com as palavras-chave de artigos preliminares selecionados.

Desta forma, o resultado do número de pesquisas coletadas para cada grupo foi de 150, 99 e 77 artigos para os grupos de palavras-chave e *strings* 01, 02 (“Delay” AND ("Air Transportation" OR "Airport" OR "Airline" OR " Airplane") AND ("Prediction" OR "Prevision") AND "Machine Learning") e 03 (“Delay” AND ("Air Transportation" OR "Airport" OR "Airline" OR " Airplane") AND ("Forecast" OR "Predict" OR "Estimate") AND "Machine Learning"), respectivamente.

Uma análise bibliométrica das palavras-chave dos artigos levantados para o grupo 01, com recorrência simultânea de no mínimo cinco pesquisas, demonstram que, numa visualização sobreposta ao longo dos anos, uma maior recorrência no uso de *machine learning* como método de previsão de atrasos de voos, a partir de 2019.

Por outro lado, métodos clássicos estatísticos de regressão, como a regressão logística e os modelos estocásticos, vão perdendo a participação nas análises realizadas. Este comportamento é um possível indicativo de que o uso das técnicas estatísticas servia como modelo preditivo principal, porém, depois foram utilizadas apenas como modelo de validação para a entrada de outros métodos, como os de *machine learning*, e assim deixando de serem aplicados.

Para o grupo 2, ao serem verificados os autores co-citados com maior representação nas análises de previsão, mais de 10 citações recorrentes, os resultados indicam que os autores que aparecem como referência em no mínimo vinte trabalhos correspondem a apenas 20% do total de artigos levantados.

Os três grupos linhas de pesquisa formados pelo software caracterizam a correlação entre os autores presentes em cada grupo, sendo cada linha de pesquisa liderada por um autor com um trabalho de maior impacto.

O grupo liderado por Schultz et al. (2021), analisou o impacto das condições climáticas na pontualidade dos voos em aeroportos americanos. Os métodos mais empregados nesse grupo foram as redes neurais artificiais, principalmente as redes para reconhecimento de padrões de dados como as recorrentes e convolucionais.

O segundo grupo, liderado por Kim, Choi, Brinceno e Mavris (2016) definem estudos técnicos de aplicação de métodos de aprendizado para bancos de dados densos, as chamadas *deep learning*, no tráfego aéreo americano. Entre os métodos aplicados, são destaques do grupo as redes neurais recorrentes (*Recurrent Neural Networks - RNN*, em inglês) e o K-ésimo vizinho mais próximo (*k-nearest neighbors algorithm*, em inglês).

Por fim, o grupo de maior impacto de co-ocorrências, com 39 citações, e maior densidade de correlações (medidas por conexões), 982 conexões existentes, é o grupo liderado por Hansen. O terceiro grupo tem enfoque em análises de eficiência de rota (Liu, Hansen, Ball, & Lovell, 2021), na sazonalidade e nas condições climáticas (Gurkaran & Hansen, 2013).

Desta forma, caracterizar a eficiência média dos modelos de *machine learning* em realizar previsões de atrasos dos voos, além de definir uma situação adequada de dados e zonas

analisadas, permitirão servir como base a estudos futuros e a aproximar as respostas obtidas a situação real de um aeródromo ou linha aérea.

3.2. Acurácia universal dos métodos de *machine learning*

Ao analisar um cenário em que as regressões por predição classificatória binária (0 = voo *on-time*, 1 = voo atrasado), denominado de cenário A, 14 artigos que continham as informações de número total de voos aplicados na pesquisa e a acurácia do sistema para esse tipo de previsão foram utilizados.

O resultado do modelo revisão sistêmica randômica para o cenário A, Figura 3, indica que foram consideradas as dimensões das amostras aplicadas nos estudos, visto os mesmos pesos serem atribuídos aos artigos estudados. Esta análise apresenta como resultado para os métodos de *machine learning* no geral 82,59% de acurácia média, com variação de 87,37 % e 77,22% para mais e para menos, respectivamente.

Da mesma maneira, um modelo de meta análise de proporção com 15 artigos selecionados, os quais possuíam os mesmos parâmetros aplicados na análise para o cenário A, com distinção as acurácias das previsões analisadas, sendo do tipo regressão, ou seja, o modelo previa e atribuía os atrasos classes definidas pelos autores, de acordo com o tempo de atraso, denominado de cenário B. O resultado indica uma melhora na acurácia média dos métodos aplicados, com 85,96% de precisão dos resultados, numa faixa de erro variante em 4,56% e 5,28% para mais e para menos, respectivamente, Figura 4.

Contudo, com a alta heterogeneidade entre os artigos analisados no cenário A e B, é necessário realizar a distribuição dos estudos pela assimetria de gráfico de funil, com base no método de regressão linear.

Para isso foi aplicado um teste estatístico baseado no método FPV de Macaskill et al. (2001), o qual utiliza uma regressão linear ponderada do efeito do tratamento no tamanho total da amostra com pesos recíprocos à variância da probabilidade média do evento.

A alta similaridade entre os artigos levantados para os dois cenários fazem com que os resultados sejam iguais as duas análises. Desta forma, com uma distribuição t modular de 1,05 e p-valor de 0,3123, a estatística define o descarte da hipótese nula de existência de vieses de publicação entre as pesquisas analisadas.

Contudo, ao se verificar a distribuição do erro padrão pela prevalência normalizada pelo método da proporção transformada em arco duplo de Freeman-Turkey no gráfico de túnel, Figura 2, é possível tomar a conclusão contrária do teste estatístico, já que, apenas um trabalho se enquadra dentro do intervalo de confiança de 95% representado pelo funil.

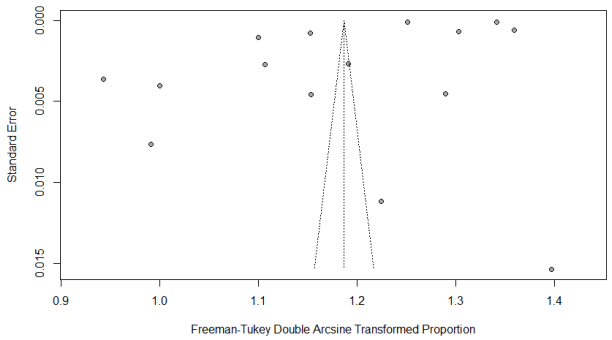


Figura 2 Gráfico de túnel, método de Freeman-Turkey.

Portanto, pode se concluir que, apesar da apresentação dispersa dos estudos no gráfico de funil, as análises estatísticas revelam que não há uma tendência viesada dos estudos, sendo este um comportamento característico de estudos de prevalência, os quais não obedecem a uma distribuição normal, podendo ser adotadas as acurácias universais obtidas.

3.3. Fatores de influência a acurácia

Para definir os ambientes mais adequados a atingir melhores resultados de acurácia dos modelos preditivos, foram definidos cenários de artigos em que a área de análise (aeroporto ou linha aérea) e de estudo (região analisada, neste caso o país) fossem conhecidos, cenários C e D, respectivamente.

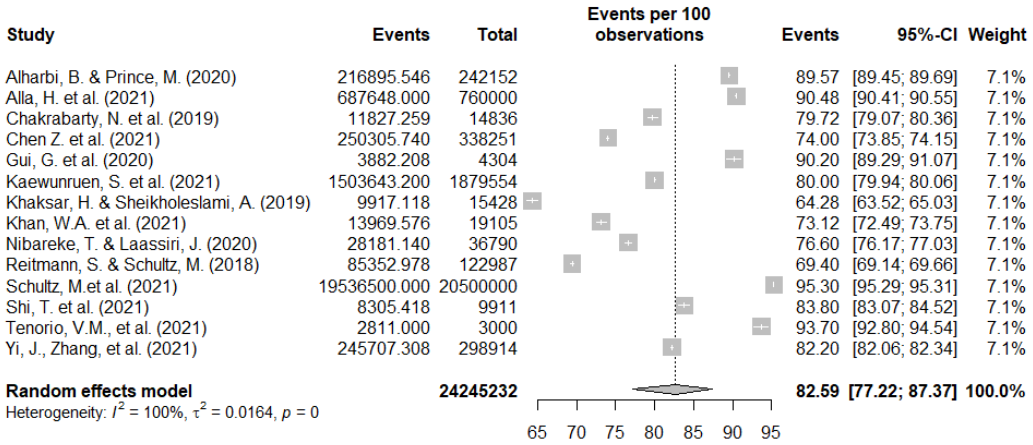


Figura 3: Cenário A: cenário de regressões por predição classificatória binária (0 = voo on-time, 1 = voo atrasado).

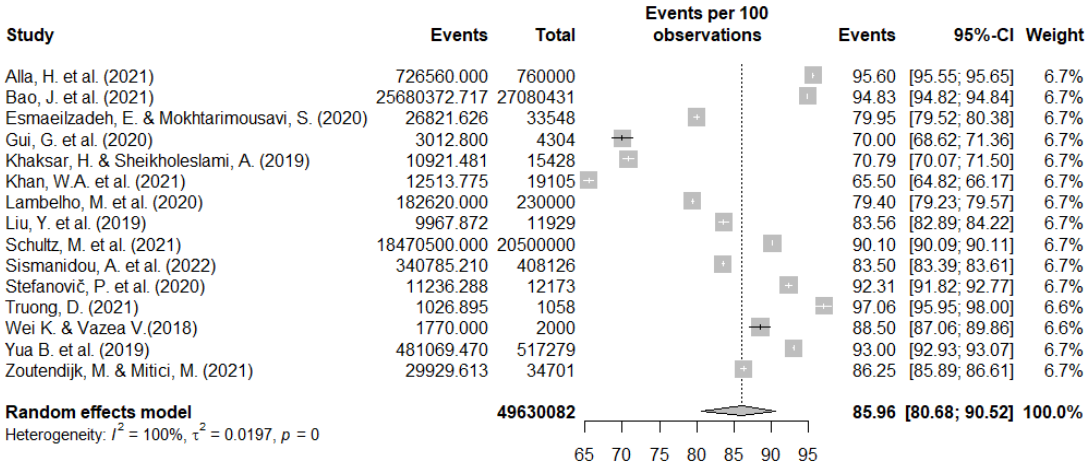


Figura 4: Cenário B: cenário de regressão dos atrasos por classes definidas.

O cenário C utiliza a acurácia dos modelos de previsão por classificação binária para caracterizar os estudos, assim como o cenário A. Os efeitos das áreas de análise, Tabela 1, demonstram que áreas mais amplas, como prever atrasos para todo um aeroporto, possuem menor capacidade assertiva.

Tabela 1 - Cenário C acurácia dos modelos de previsão por classificação binária para caracterizar os estudos.

Área de análise	*Nº de artigos*	*Acurácia média*	*Intervalo de variação positiva*	*Intervalo de variação negativa*
Linhas Aéreas	7	85,47%	6,12%	7,44%
Aeroportos	7	79,50%	6,77%	7,72%

Da mesma forma, foram verificadas as proporções tendo como subgrupos os países estudados pelos artigos do cenário C, Figura 5. Os resultados apresentam indicativos de que, as análises mais específicas, como a de Alharbi & Prince (2020) que utilizaram dados de companhias aéreas específicas da Arábia Saudita e uma maior quantidade de variáveis conhecidas, obtiveram uma maior eficácia na previsão dos atrasos.

Com artigos de previsão de atrasos por regressão, foram realizadas metanálises de proporção por subgrupos com a área de análise e estudo para o cenário D, Tabela 2.

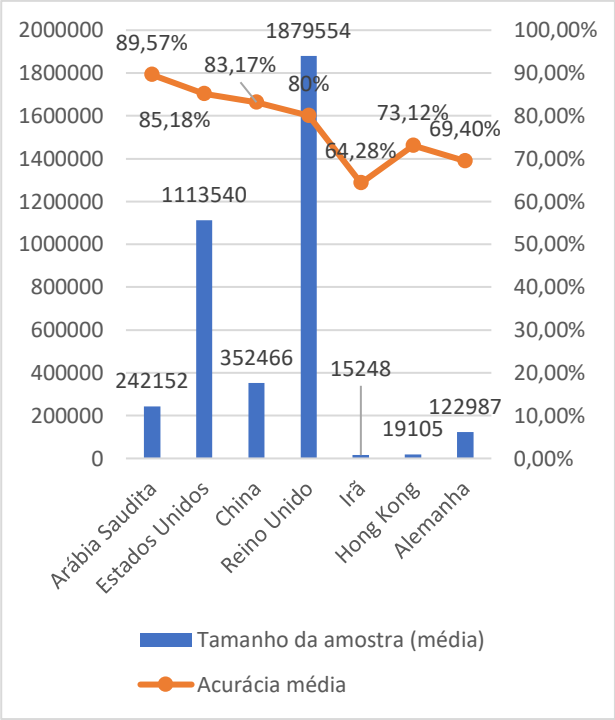


Figura 5: Proporções de acurácia e tamanho da amostra tendo como subgrupos os países estudados pelos artigos do cenário C.

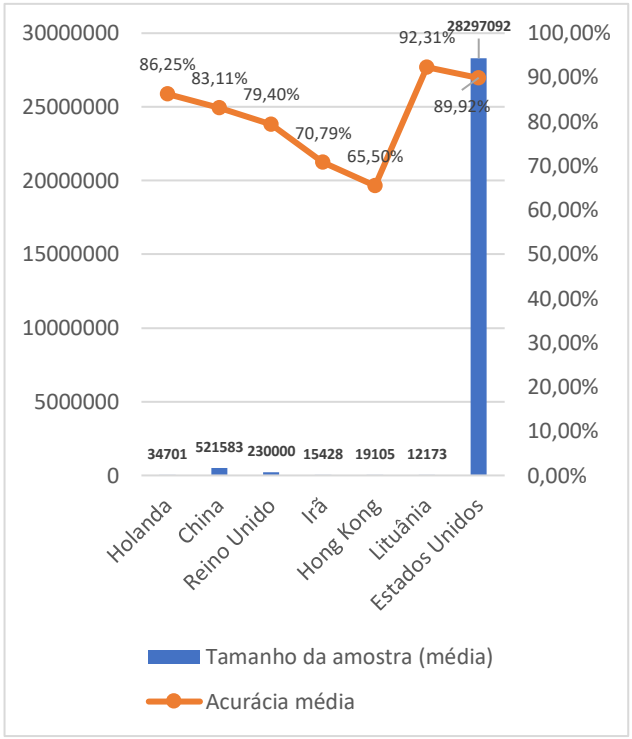


Figura 6: Proporções de acurácia e tamanho da amostra tendo como subgrupos os países estudados pelos artigos do cenário D.

O estudo em linhas aéreas apresentou uma maior margem de erro para a previsão em classes de atrasos. Por outro lado, as análises de aeroportos obtiveram uma maior acurácia média e um erro variante tolerável. Uma hipótese para este comportamento é a de que: quanto maior a especificidade das informações do voo para a obtenção de uma previsão em classes de atrasos, melhor a capacidade de generalização da resposta pelo modelo.

Tabela 2 - Cenário D análise de subgrupo com a área de estudo.

Área de análise	*Nº de artigos*	*Acurácia média*	*Intervalo de variação positiva*	*Intervalo de variação negativa*
Linhas Aéreas	3	80,77%	14,64%	21,47%
Aeroportos	12	85,96%	4,32%	5,05%

Assim como observado para o cenário C na Figura 6, para a análise de subgrupo com a área de estudo, o cenário D apresenta um comportamento em que, as especificidades do país analisado são mais importantes do que a quantidade de dados.

Um indicativo observado em ambas as situações é o de que: em países com movimentação aérea inferior a americana, como o caso da Holanda e da Arábia Saudita, o nível de generalização das respostas dos modelos de previsão aplicados é mais eficaz em relação ao tamanho amostral analisado.

Logo, caracterizar o cenário quanto a área estudada está mais relacionada a disponibilização e capacidade dos dados obtidos em descrever o fenômeno, no caso o atraso em um voo específico, do que ao tamanho da amostra ou da região de investigação.

3.4. Seleção do método mais eficaz

Não apenas especificar a área, mas o método utilizado é capaz de definir melhores resultados de acurácia nas previsões em ambas as possibilidades de análise, regressão ou classificação.

O método da Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA, em inglês) foi aplicado, tendo como finalidade definir, entre os artigos levantados pelos modelos C e D, qual o método capaz de maximizar as eficiências obtidas a partir das amostras utilizadas, Tabela 3.

Tabela 3 Distribuição dos artigos pelo ano, tipo de análise e área de estudo. Os métodos mais acurados de *machine learning* aplicados nos estudos foram: [a] Árvore de decisão, [b] *deep belief network*, [c] *Ensemble learning*, [d] Floresta Randômica, [e] *Gradient Boosting Trees*, f Máquina de vetores de suporte, [g] Memória de curto prazo longa, [h] Rede Neural Artificial Profunda, [i] Rede Neural de Convolucional Gráfica, [j] Rede *Neural MultiLayer Perceptron* e [k] Redes Neurais Recorrentes.

Anos	*Previsão Climática*		*Previsão Universal*	
	Linha Aérea	*Aeroporto*	*Linha Aérea*	*Aeroporto*
2018		[g]Reitmann & Schultz		[e]Wei & Vazea
2019	[e]Etani		[e]Chakrabarty *et al.* [a]Khaksar & Sheikholeslami [h]Saadat & Moniruzzaman. [d]Liu et al.	[b]Yua *et al.*
2020			[j]Alharbi & Prince [g]Gui *et al.*	[f]Esmaeilzadeh & Mokhtarimousavi [a]Lambelho *et al.* [a]Nibareke & Laassiri [e]Stefanovič *et al.*
2021		[c]Chen *et al.* [d]Kaewunruen *et al.* [k]Schultz *et al.*	[j]Alla *et al.* [j]Shi *et al.* [e]Tenorio *et al.*	[i]Bao *et al.* [j]Cheevachaipimol *et al.* [e]Khan *et al.* [c]Yi *et al.* [d]Zoutendijk & Mitici
2022				[j]Sismanidou *et al.*

As variáveis selecionadas para o DEA definem a acurácia obtida de acordo com as condições adequadas para os cenários de estudo verificadas anteriormente, Tabela 4. Deste modo, são saídas do sistema tanto a acurácia obtida pelo modelo aplicado, quanto o fator de impacto da revista de publicação do artigo, considerando assim a confiabilidade da pesquisa realizada.

As entradas do modelo desenvolvido, os *inputs*, caracterizam cada técnica de *machine learning* aplicada pelo respectivo autor em seu estudo, garantindo a individualidade das Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Unit* – DMU, em inglês) exigidas pelo *software* empregado na análise, *MaxDEA*.

Tabela 4 Variáveis selecionadas para o DEA.

Variável aplicada	*Tipo*
Autores	DMU
Acurácia do modelo aplicado	Output
Fator de Impacto da revista	Output
Ano de publicação	Input
Tamanho da amostra	Input
Número de unidades previstas corretamente	Input

Assim, o tamanho da amostra e o número de voos previstos corretamente pelo sistema definem as DMU's pelas proporções analisadas anteriormente nas metaanálises desenvolvidas. O ano da publicação definem o

peso da originalidade e fator inédito da pesquisa.

Desta forma, foi utilizado o modelo com retornos variáveis de escala – BCC, orientado maximização das saídas do sistema, dadas as entradas definidas para cada DMU. Contudo, os resultados iniciais de eficiência foram muito semelhantes para o cenário C, fazendo necessária a aplicação de um critério de desempate entre os modelos.

O modelo de desempate utilizado foi o de Savage (1950), aplicado com coeficientes de otimismo (α) de 50% para ambas as fronteiras, clássica e invertida, Tabela 5. A proximidade entre os resultados, apesar dos critérios de desempate aplicados, demonstra que a eficiência dos métodos para previsão por classificação é relativamente próxima.

Tabela 5 Modelos de desempate das eficiências para o Cenário C.

DMU	*Eficiência*		
	Clássica	*Invertida*	*Relativa*
Chakrabarty, N. et al. (2019)	1	0,9995	0,5002
Gui, G. et al. (2020)	1	0,9995	0,5002
Khan, W.A. et al. (2021)	1	1	0,5
Nibareke, T. & Laassiri, J. (2020)	1	1	0,5
Schultz, M.et al. (2021)	1	1	0,5
Tenorio, V.M., et al. (2021)	1	1	0,5
Khaksar, H. & Sheikholeslami, A. (2019)	1	1	0,5
Alharbi, B. & Prince, M. (2020)	0,9930	1	0,4965
Shi, T. et al. (2021)	0,8943	1	0,4471
Yi, J., Zhang, et al. (2021)	0,8833	1	0,4416
Kaewunruen, S. et al. (2021)	0,8574	1	0,4287
Chen Z. et al. (2021)	0,8174	1	0,4087

Entretanto, as respostas obtidas pelos métodos aplicados nos sete primeiros artigos: *gradient boosting trees*, memória de curto prazo longa, árvore de decisão e redes neurais recorrentes, respectivamente, são as que conseguiram atribuir uma melhor acurácia visto os cenários e dimensão dos dados aplicados.

Vale salientar ainda que o método de *gradient boosting trees* pode ser nomeado o de melhor performance, visto que foi aplicado em três dos sete artigos com melhor eficiência pelo DEA, Chakrabarty et al. (2019), Khan et al. (2021) e Tenorio et al. (2021).

Já para a definição do método de previsão por regressão, cenário D, o DEA BCC orientado a *output* foi utilizado definindo a fronteira clássica e a eficiência relativa pelo critério de Savage (1950). Foram novamente utilizados coeficientes de otimismo (α) igual a 50% para ambas as fronteiras, Tabela 6.

Tabela 6 Modelos de desempate das eficiências para o Cenário D.

DMU	*Eficiência*		
	Clássica	*Invertida*	*Relativa*
Wei K. & Vazea V.(2018)	1	0,9981	0,5009
Liu, Y. et al. (2019)	1	0,9985	0,5007
Yua B. et al. (2019)	1	0,9985	0,5007
Truong, D. (2021)	1	0,9995	0,5002
Gui, G. et al. (2020)	1	0,9998	0,5000
Schultz, M. et al. (2021)	1	0,999	0,5000
Bao, J. et al. (2021)	1	1	0,5
Khan, W.A. et al. (2021)	1	1	0,5
Stefanovič, P. et al. (2020)	0,9794	0,9991	0,4901
Sismanidou, A. et al. (2022)	0,8948	1	0,4474
Zoutendijk, M. & Mitici, M. (2021)	0,8886	1	0,4443
Lambelho, M. et al. (2020)	0,8575	0,999	0,4291

A distinção entre as DMU's é mais clara para a análise do cenário D. A complexidade dos dados e das previsões exigem dos modelos

aplicados uma maior capacidade de generalização.

Apesar dos oito primeiros artigos possuírem valores significativamente próximos de eficiência relativa, os métodos que se destacaram para os cenários aplicados foram: *deep belief network*, floresta randômica, *gradient boosting trees* e as redes neurais recorrentes e convulacionais.

4. CONCLUSÕES

A partir das discussões apresentadas, é clara a tendência em aplicar métodos mais robustos de análise e regressão de dados para a previsão de atrasos na aviação mundial.

Diante da infinidade de métodos classificados como *machine learning*, alguns se destacam frente a complexidade e disponibilidade das informações necessárias a realização destas previsões.

Para caracterizar um atraso, a dimensão buscada dos dados deve ser mais próxima as especificidades das etapas a serem realizadas pelos voos do que da quantidade de dados em si.

Portanto, cabe a acurácia dos métodos estar atrelada a definição específica da área a ser analisada e dos principais fatores que geram essas ocorrências.

CONCLUSÕES

Alharbi, B., & Prince, M. (2020). *A Hybrid Artificial Intelligence Approach to Predict Flight Delay*. International Journal of Engineering Research and Technology, 814-822.

Bao, J., Yang, Z., Zeng, W.,2019.*Graph to sequence learning with attention mechanism for network-wide multi-step-ahead flight delay prediction*.Transportation Research Part C: Emerging Technologies

Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P., & Rothstein, H. R. (2010*). A basic introduction to fixed-effect and random-effects models for meta-analysis*. Res Synth Methods, 97-111.

Chakrabarty, N., Kundu, T., Dandapat, S., Sarkar, A., Kole, D.K.,2019.*Flight arrival delay prediction using gradient boosting classifier*.Advances in Intelligent Systems and Computing

Cheevachaipimol, W., Teinwan, B., Chutima, P.,2021.*Flight delay prediction using a hybrid deep learning method*.Engineering Journal

Chung, S.-H., Ma, H.-L., Hansen, M., & Choi, T.-M. (2020). *Data science and analytics in aviation.* Transportation Research Part E, 134.

Esmaeilzadeh, E., Mokhtarimousavi, S.,2021.*Machine Learning Approach for Flight Departure Delay Prediction and Analysis*.Transportation Research Record

Gui, G., Liu, F., Sun, J., (...), Zhou, Z., Zhao, D.,2018.*Flight delay prediction based on aviation big data and machine learning*.IEEE Transactions on Vehicular Technology

Gurkaran, B., & Hansen, M. (2013). *Generating day-of-operation probabilistic capacity scenarios from weather forecasts*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 153-166.

Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., Xiang, Y.,2021.*Identification of weather influences on flight punctuality using machine learning approach*.Climate

Khaksar, H., Sheikholeslami, A.,Ano.*Airline delay prediction by machine learning algorithms*.Scientia Iranica

Khan, W.A., Ma, H.-L., Chung, S.-H., Wen, X.,2020.*Hierarchical integrated machine learning model for predicting flight departure delays and duration in series.*Transportation Research Part C: Emerging Technologies

Kim, Y., Choi, S., Briceno , S., & Mavris, D. (2016). *A deep learning approach to flight delay prediction*. 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), (pp. 1-6).

Lambelho, M., Mitici, M., Pickup, S., Marsden, A.,2019.*Assessing strategic flight schedules at an airport using machine learning-based flight delay and cancellation predictions*.Journal of Air Transport Management

Liu, Y., Hansen, M., Ball, M. O., & Lovell, D. J. (2021). *Causal analysis of flight en route inefficiency*. Transportation Research Part B: Methodological, 91-115.

Liu, Y., Liu, Y., Hansen, M., Pozdnukhov, A., Zhang, D.,2021.*Using machine learning to analyze air traffic management actions: Ground delay program case study*.Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review

Liu, Y., Yin, M., & Hansen, M. (2019). *Economic costs of air cargo flight delays related to late package deliveries*. Transportation Research Part E, 125, 388-401.

Macaskill, P., Walter, S. D., & Irwig, L. (2001). A *comparison of methods to detect publication bias in meta-analysi*s. Statistics in Medicine, 641-654.

Nibareke, T., Laassiri, J.,2020.*Using Big Data-machine learning models for diabetes prediction and flight delays analytics*.Journal of Big Data

Reitmann, S., Schultz, M.,2020.*Computation of air traffic flow management performance with long short-term memories considering weather impact*.Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)

Saadat, M.N., Moniruzzaman, M.,2020.*Enhancing airlines delay prediction by implementing classification based deep learning algorithms*.Advances in Intelligent Systems and Computing

Savage, L. (1950). *The Foundations of Statistics*. Willey.

Schultz, M., Reitmann, S., & Alam, S. (2021). *Predictive classification and understanding of weather impact on airport performance through machine learning*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies.

Shi, T., Lai, J., Gu, R., Wei, Z.,2021.*An Improved Artificial Neural Network Model for Flights Delay Prediction*.International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence

Stefanovič, P., Štrimaitis, R., Kurasova, O.,2019.*Prediction of Flight Time Deviation for Lithuanian Airports Using Supervised Machine Learning Mode*l.Computational Intelligence and Neuroscience

Tenorio, V.M., Marques, A.G., Cadarso, L.,2021.*Signal Processing and Machine Learning for Air Traffic Delay Prediction*.Transportation Research Procedia

Wang, C., & Wang, X. (2019). *Airport congestion delays and airline networks.* Transportation Research Part E, 122, 328–349.

Wei K., Vazea V.,2021.*Modeling Crew Itineraries and Delays in the National Air Transportation System*.Transportation Science

Yi, J., Zhang, H., Liu, H., Zhong, G., Li, G.,2021.Flight Delay *Classification Prediction Based on Stacking Algorithm*.Journal of Advanced Transportation

Yua B., Guoa Z., Asian S., Wangc H., Chend G.,2020.Flight *delay prediction for commercial air transport: A deep learning approach*.Transportation Research Part E

Zoutendijk, M., Mitici, M.,2021.*Probabilistic flight delay predictions using machine learning and applications to the flight-to-gate assignment problem*.Aerospace

ESCRITÓRIO DE PROJETOS DE MELHORIA: PROPOSTA PARA EMPRESA AEROPORTUÁRIA DE MÉDIO PORTE DO BRASIL

Luís Henrique Gonçalves Costa, Mario Orestes Aguirre González, Enilson Medeiros dos Santos, Marcos André Lira Silva*, Viviane Adriano Falcão

*** Corresponding author e-mail address**: marcos.lira@ufpe.br

PAPER ID: SIT128

RESUMO

O setor de aviação no Brasil apresentava um crescimento sólido no período pré-pandemia, com o término das restrições e normalização do fluxo de passageiros é esperada uma retomada no desenvolvimento desse setor. Com o aumento do número de passageiros pode retornar também, um dos principais entraves da aviação nacional, a precariedade da infraestrutura aeroportuária, responsável por limitar capacidade de vários aeroportos. Neste contexto o presente artigo tem como objetivo apresentar uma proposta organizacional e operacional direcionada ao gerenciamento de projetos de melhorias para uma empresa aeroportuária de médio porte. O método de pesquisa é caracterizado como estudo de caso, de natureza qualitativa, adotando um *focus group* para validação da proposta de estrutura organizacional, procedimentos operacionais, e identificar as barreiras para implementação. O resultado do trabalho apresenta uma proposta considerando a integração do escritório de projetos com a estrutura organizacional da administração, a concepção do escritório de projetos, os procedimentos operacionais, bem como as diretrizes para sua implementação.

Palavras-chave: Gerenciamento de projetos, Escritório de gerenciamento de projetos, Abordagens de melhorias, Aviação civil, Aeroportos.

1. INTRODUÇÃO

A dimensão geográfica e populacional do Brasil, somadas às dificuldades de implantação de uma infraestrutura de transportes compatível com essas dimensões, fizeram com que a aviação desempenhasse, e ainda desempenhe um papel importante na integração e no desenvolvimento nacional (MEDEIROS; MARTINELLI, 2000).

A necessidade de integração para o progresso nacional, diante do papel da aviação brasileira, implica, diretamente, a necessidade de melhorias da infraestrutura aeroportuária existente. A cada dia, mais e mais usuários passam a utilizar o transporte aéreo para se deslocar ou transportar mercadorias, seja devido à redução dos custos no setor, ou pela velocidade para realização do trajeto.

Devido à pandemia, diversos países optaram por adotar medidas de restrições que incluem também limitações para operação de transporte aéreo, gerando redução no fluxo de tráfego (QUILTY et al., 2020).

Ao mesmo tempo em que a sociedade normaliza as condições de movimentação, crescem novamente a demanda serviços aéreos. Como consequência, há a necessidade de melhorias na infraestrutura e nos serviços dos aeroportos, gerando uma carência por elaboração e implantação de projetos de melhoria e ou otimização com eficiência e eficácia visando à melhoria da infraestrutura e dos serviços dos aeroportos.

Diante da necessidade de implantação dos projetos, necessários à melhoria da infraestrutura aeroportuária, com eficiência e eficácia, foi feito o estudo da implantação de um Escritório de Gerenciamento de Projetos, baseado nos conceitos do PMI, partindo do princípio da inovação, direcionado para uma mudança na cultura organizacional, dentro de uma empresa de capital público, na área de administração da infraestrutura aeroportuária da aviação civil, em aeroportos de médio porte, como uma ferramenta que possa dar o suporte necessário para o gerenciamento dos projetos demandados, buscando, assim, atingir as metas relacionadas a prazos e orçamento proposto, dentro da adequação às necessidades de segurança e saúde do trabalho na realização dos projetos.

Especificamente, o objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de estrutura organizacional e procedimentos operacionais para a implantação de um escritório de projetos que visa ao gerenciamento de projetos de melhoria de uma empresa aeroportuária de médio porte.

2. GERENCIAMENTO DE PROJETOS E ESCRITÓRIO DE PROJETOS

A base teórica da pesquisa envolveu os temas sobre Gerenciamento de Projetos – conceito, estruturação, PMBOK, e estruturas organizacionais; e Escritório de Projetos – conceito, função, importância, implantação e fatores de sucesso.

2.1. Gerenciamento de projetos

O gerenciamento de projetos é responsável por supervisionar e gerir a mudança. Uma das principais tarefas de gerenciamento de projetos é a resolução do conflito. A linha de autoridade é, muitas vezes, confusa já que os recursos são provenientes de outras funções dentro da organização e isso, geralmente, leva a conflitos (MAGNÚSDÓTTIR, 2012).

O PMI (2012) organiza o conhecimento do gerenciamento de projetos em dez, assim chamadas, áreas de conhecimento: gerenciamento de integração; de escopo; de tempo; de custos; da qualidade; de recursos humanos; das comunicações; de riscos; das aquisições de projetos e gerenciamento das partes interessadas. Essas áreas estão relacionadas aos diversos aspectos que devem ser cuidados no gerenciamento de qualquer projeto, com maior ou menor intensidade em alguns desses aspectos, dependendo da área de aplicação do projeto.

Além dessas áreas de conhecimento, o PMI (2012) define, também, cinco grupos de processos que imprimem um sequenciamento às ações de gerenciamento de projetos. Esses cinco grupos de processos são: processos de iniciação; de planejamento; de execução; de controle e processos de encerramento.

Para Kerzner (2006), a cultura de gestão de projetos que apresenta melhores resultados é aquela baseada em confiança, comunicação, cooperação e trabalho em equipe. Quando a

base da gestão de projetos é sólida, a estrutura organizacional se torna quase irrelevante. Reestruturar uma organização somente para adicionar a gestão de projetos é desnecessário. As organizações com excelência em gestão de projetos podem assumir qualquer formatação. Muitas empresas seguem o gerenciamento por matriz. Qualquer formatação pode dar certo, desde que tenha as seguintes características:

- Sejam organizadas em torno de equipes de projeto não-exclusivas;
- Tenham hierarquia organizacional horizontal;
- Pratiquem gestão de projetos informal;
- Não considerem decisiva a quantidade de relatórios dos gerentes de projetos.

2.2. Escritório de Projetos

Gerir diversos projetos simultaneamente é um desafio que as organizações têm que dominar, a fim de atingir seus objetivos estratégicos (DIETRICH; LEHTONEN, 2004; DIETRICH; LEHTONEN, 2005). Embora a literatura de gerenciamento de projetos ainda se concentre, principalmente, em projetos individuais, as pesquisas realizadas, nos últimos cinco anos, têm, cada vez mais, reconhecido que a gestão de múltiplos projetos tornou-se fundamental para todas as organizações, independe da realização de projetos para clientes externos ou internos. O Escritório de Projetos tem surgido dentro da necessidade de gerenciamento desses multiprojetos como um dispositivo importante para desenvolver com competência em gestão de projetos, a gestão do desempenho de um único projeto, bem como coordenar vários projetos e os envolvidos nesses (UNGER; GEMÜNDEN; AUBRY, 2012).

O PMI (2012) coloca que “um escritório de projetos (Project Management Office, PMO) é um corpo ou entidade organizacional à qual são atribuídas várias responsabilidade relacionadas ao gerenciamento centralizado e coordenado dos projetos sob seu domínio. As responsabilidades de um PMO podem variar desde fornecer funções de suporte ao gerenciamento de projetos até ser responsável pelo gerenciamento direto de um projeto”.

Na literatura verifica-se que alguns autores tratam o Escritório de Projetos quando esse vem a gerenciar projetos, podendo ser desde um único projeto a vários projetos. Quando é tratado como Escritório de Gerenciamento de Projetos (PMO), sua função passa por gerenciar projetos, e atuar sobre as questões estratégicas da organização, implantando novos princípios, metodologias, práticas, e ferramentas de gerenciamento de projetos. No entanto, independente da nomenclatura, para gerenciar projetos, o Escritório de Projetos, também, poderá atuar no que tange às questões estratégicas.

2.2.1. Função de um Escritório de Projetos

A função do escritório de projetos é definida de acordo com a adequação à estrutura organizacional e a nível de gerenciamento de projetos que a empresa se propõe a realizar (CRAWFORD et al., 2005). Na literatura são encontradas que para definir as funções dos escritórios de projeto, existem três principais áreas: desenvolvimento, suporte e controle. As funções de desenvolvimento são aquelas que envolvem o recrutamento, o treinamento e o desenvolvimento dos gerentes de projeto. As funções de suporte são aquelas que ajudam os gerentes de projeto a fazer seu trabalho de uma maneira melhor através do oferecimento de assistência e clareza com os processos do gerenciamento de projetos. As funções de controle são aquelas da gerência funcional e incluem: a avaliação de gerentes de projeto, a alocação de gerentes de projeto a projetos, a garantia de que as entregas dos projetos são produzidas e se apresentam com uma qualidade adequada e o estabelecimento de padrões (PATAH et al., 2009).

2.2.2. Barreiras e desafios na implantação de Escritório de Projetos

A implantação de escritórios de projetos apresenta desafios, principalmente, por estar lidando com pessoas, mudando cultura, criando processos, novas abordagens, integrando esses elementos em todas as unidades de negócios, e coordenando equipes de diferentes tamanhos, tecnologias, complexidade e de interesses comerciais (CRAWFORD, 2011). O PMO é uma função projetada para facilitar a gestão dos projetos, melhorando a gestão de toda a empresa através da gestão de portfólio de projetos

ligados à estratégia empresarial. Mais do que um escritório e criação de relatórios, está infundindo numa mudança cultural de toda a organização. A premissa básica para adesão de um PMO é agir de forma rápida, mostrar resultados dentro de seis meses, começar, de fato, a mudar a cultura dentro do primeiro ano, e apontar resultados corporativos dentro de um prazo máximo de dois anos. Vale ressaltar, que é provável que a implantação total do PMO leve de dois a cinco anos.

Embora, recentemente, PMO seja um recurso bem-sucedido na gestão de projetos da organização, a lógica subjacente que leva à implementação bem-sucedida ainda não é compreendido (AUBRY et al., 2010). A implementação de um PMO, dentro das organizações, é uma decisão que tem que ser bem fundamentada, considerando que ela muda a estrutura organizacional da empresa. De acordo com Stanleigh (2006), a taxa de fracasso nas implementações de PMO é muito alta, superior a 75%. E, a principal razão para o fracasso na implementação deve-se ao fato de que o PMO não consegue demonstrar a importância para as organizações. Eles são vistos como muito caro e têm contribuído pouco para o desempenho de projetos.

Com base na literatura, observa-se que a metodologia apresentada pelo PMI no que se refere ao desenvolvimento de projetos utilizando o guia PMBOK® é adequada para realização dos processos de iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle, e encerramento. Assim, a utilização dos procedimentos apresentados pelo guia se faz necessária para a busca do sucesso dos projetos a serem desenvolvidos.

A proposta de Kerzner (2006), quando trata o Escritório de Projetos de Grupos de Clientes, parece adequada para implantação na administração aeroportuária de um aeroporto de médio porte, por tratar-se de uma estrutura organizacional funcional, onde o Escritório de Projetos Aeroportuário (EPA) deverá se integrar com as diversas áreas da administração.

Os conceitos de Crawford (2011), que coloca a sugestão de adotar o Escritório de Projetos do tipo Nível 1 – Escritório de controle de um projeto único, geralmente de grande porte e complexidade, com vistas a buscar resultados em curto prazo, como forma a promover a integração da equipe com o gerenciamento de projetos, e motivando através dos resultados de melhoria obtidos, também parece adequada, quando tratamos de uma empresa de capital público, onde os resultados em curto prazo são necessários para melhoria da gestão empresarial.

3. MÉTODO DA PESQUISA

A pesquisa em foco é de abordagem qualitativa, considerando que não há preocupação na quantificação de variáveis, tampouco a estrutura e os elementos da estrutura do objeto de estudo. A pesquisa procura, através da interpretação dos dados levantados, descrever a proposta apresentada no objetivo geral.

Foi adotado o estudo de caso para investigar e buscar a solução para o problema proposto. Para isso, o trabalho foi dividido em sete etapas:

1. *Definição do problema de pesquisa*

Para definição do problema a ser pesquisado, procedemos a uma análise da conjuntura atual da aviação civil. Nesse contexto, foi identificado que o aumento da demanda na aviação civil pelo transporte aéreo, superior a 50% nos últimos cinco anos, tem feito com que os aeroportos brasileiros atinjam sua capacidade de operação. Ao mesmo tempo que a sociedade utiliza mais o transporte aéreo, crescem as cobranças por melhorias na infraestrutura dos aeroportos.

2. *Apresentação dos objetivos da pesquisa*

Visando à solução do problema pesquisado, adotou-se como objetivo geral a apresentação de uma proposta de estrutura organizacional e procedimentos operacionais para a implantação de um escritório de projeto que visa ao gerenciamento dos projetos de melhoria de uma empresa aeroportuária de médio porte.

3. *Construção do referencial teórico*

Para formação do referencial teórico, buscou-se realizar uma pesquisa com base em livros, revistas, outros trabalhos, artigos, meio eletrônico, publicados em sites de periódico, bases de dados como Periódicos Capes, Scielo, Web of Knowledge, SciVerse Scopus, entre outros, e, em casos práticos, pertinentes

ao tema abordado, focando: gerenciamento de projeto; e escritório de projetos.

Em relação à pesquisa de artigos relacionados, essa foi realizada nas bases de dados citadas anteriormente, utilizando como palavras-chave: airport, project management, project management office, project office. O critério para ordenação dos artigos foi por relevância. A partir desses artigos, outros artigos citados foram utilizados para construção do referencial teórico. Para a formatação de cada tema pesquisado, utilizaram-se, no mínimo, cinco artigos relacionados. Em conjunto com a formação do referencial teórico, buscou-se verificar a existência de trabalhos para implantação de escritório de projetos em outras entidades de administração pública ou privada.

4. *Análise do modelo de produção de serviço de um aeroporto de médio porte no Brasil*

Para conhecimento da estrutura organizacional do estudo de caso em tela, foi feita pesquisa no site institucional da empresa, onde foram identificados: a constituição da empresa, os objetivos, atuação, negócio e missão empresarial. Verificaram-se, ainda, a estrutura organizacional, identidades corporativas e políticas empresariais.

Para o desenvolvimento do estudo de caso, foi realizado no período de junho de 2012 a julho de 2013, sendo escolhido o Aeroporto Internacional de Natal – Augusto Severo, situado em Parnamirim/RN, por se tratar no período de um aeroporto de médio porte no Brasil, além da facilidade na pesquisa, já que o pesquisador trabalha diretamente no local pesquisado. Ademais, foi efetivada, também, uma pesquisa no site institucional da empresa, apresentando um breve histórico sobre o aeroporto, os dados sobre o complexo aeroportuário, e o crescimento do sítio aeroportuário.

Quanto à análise do modelo de produção de serviço, o conhecimento partiu de observações diretas, buscando o melhor entendimento da operação do aeroporto, com foco na observação do funcionamento operacional e metodologia dos negócios. Assim, culminou com conversas informais com funcionários para entendimento do modelo de gestão, associando a estrutura organizacional existente para implantação de um escritório de projetos de melhoria, com base nos conceitos do PMI.

5. *Elaboração da proposta inicial para o Escritório de Projetos*

A proposta inicial para o Escritório de Projetos de melhoria – estrutura organizacional e procedimentos operacionais – para implantação na administração aeroportuária foi levada a efeito com base no referencial teórico, considerando outros trabalhos desenvolvidos para implantação de escritórios de projetos em entidades de administração pública ou privada, em reuniões com o orientador do mestrado, bem como no projeto de elaboração de proposta de estruturação de um Núcleo de Ideação na UFRN, desenvolvido pela Engenheira de Produção, coordenado por um Prof. Dr., com contribuição deste pesquisador e de dois engenheiros de produção.

6. *Validação da proposta inicial para o Escritório de Projetos*

Com a proposta elaborada, procurou-se apresentar através de *focus group* para a administração aeroportuária em estudo, com participação de um extrato compreendido pelo Superintendente e representantes das áreas de Operações, Segurança, Segurança Operacional, Manutenção, Meio Ambiente, Qualidade, Recursos Humanos, Comercial, Logística e Cargas, e, Engenharia, para realização de uma análise crítica da proposta apresentada, a fim de identificar possíveis obstáculos internos e externos que possam dificultar ou impedir a implantação do escritório de projetos, bem como aferir sugestões de melhoria para a proposta.

O *focus group* seguiu o seguinte roteiro:

a) Apresentação sucinta do Projeto, visando esclarecer sobre o tema desta pesquisa.

b) Apresentação da proposta inicial para o Escritório de Projetos para implantação na administração aeroportuária, incluindo a estrutura organizacional, os procedimentos operacionais e diretrizes para implantação.

c) Abertura para os participantes realizarem uma análise crítica da proposta, identificando adequação ou oportunidades de melhoria quanto ao posicionamento do EPA na Estrutura Organizacional da administração aeroportuária, a própria estrutura

organizacional do EPA, possíveis obstáculos internos e externos que possam impedir ou dificultar a implantação do escritório de projetos, as diretrizes para implantação, além da opinião quanto à viabilidade para implantação da proposta.

A realização do *focus group* foi necessária para validação da proposta inicial, com participação da equipe técnica de gestão da administração aeroportuária, com vistas à adequação da proposta, considerando a vivência desses no que tange ao desenvolvimento dos projetos.

7. *Análise dos dados obtidos e apresentação da proposta para o Escritório de Projetos*

Os resultados obtidos pelo presente trabalho tratam de uma interpretação do pesquisador, com aferição dos conceitos embasados no referencial teórico, montando a proposta com base nesses conceitos, em opiniões especializadas, e no contexto apresentado pela administração aeroportuária, e validada através de um *focus group* realizada com partes interessadas e envolvidas nos processos de melhoria.

As sugestões e opiniões apresentadas, no *focus group*, foram avaliadas, e, em seguida, feitas as adequações necessárias para a proposta, formatando a proposta final para implantação do escritório de projetos como ferramenta de apoio á administração.

4. ESTUDO DE CASO – A INFRAERO NATAL

O Aeroporto Internacional Augusto Severo fica localizado no município de Parnamirim (RN), a 18 km da cidade de Natal. Na época da aplicação da pesquisa era o principal aeroporto do Rio Grande do Norte, sendo substituído em 2014 pelo Aeroporto Internacional Governador Aluízio Alves.

4.1. Estrutura Organizacional

A organização funcional clássica é uma hierarquia em que cada funcionário possui um superior bem definido. No nível superior, os funcionários são agrupados por especialidade, como produção, marketing, engenharia e contabilidade. As especialidades podem ser subdividas em organizações funcionais, como engenharia mecânica e elétrica. Cada departamento em uma organização funcional fará o seu trabalho do projeto de modo independente (PMI, 2012).

De acordo com as definições apresentadas pelo PMI, entende-se que a Infraero, então responsável pela administração da infraestrutura do Aeroporto Internacional Augusto Severo, em Parnamirim/RN – podia ser definida como uma administração com estrutura organizacional funcional (Fig. 4.1).

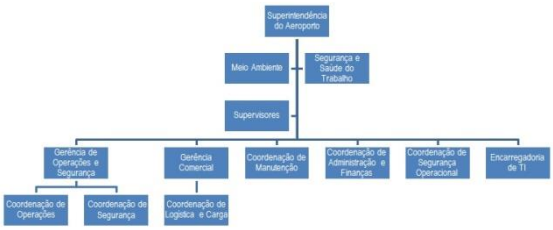


Figura 1 Estrutura Organizacional do Aeroporto Internacional Augusto Severo

4.2. Modelo de Produção de Serviços

Inicialmente, é importante ressaltar que alguns serviços são produzidos sob a responsabilidade das companhias aéreas (vendas de passagens; recebimento, guarda e transporte e devolução de bagagens aos passageiros; controle de acesso às aeronaves; serviços internos), órgãos reguladores (controle de imigração/emigração, serviços aduaneiros, controle da fauna/flora, entre outros serviços), e concessionários (alimentação, outros serviços). Para entendimento do modelo de produção de serviços de um aeroporto, relacionado com a disponibilização da infraestrutura, faz-se uma observação direta de alguns pontos considerados relevantes para receptividade dos usuários e operação aeroportuária.

1. Check-in
2. Salas de embarque e desembarque de passageiros
3. Controle de imigração
4. Aeroshopping
5. Praça de alimentação
6. Saguão
7. Outras facilidades

É possível observar que o aeroporto é uma indústria de serviços, que possui certa complexidade das operações. Os serviços são dependente do fluxo de passageiros, e esse varia durante todo o dia. No Aeroporto Internacional Augusto Severo, o fluxo de

passageiros se concentrava principalmente no turno vespertino e na madrugada.

5. PROPOSTA DO ESCRITÓRIO DE PROJETOS AEROPORTUÁRIOS

As configurações de estruturas de gerenciamento de projetos devem ser analisadas considerando a estratégia genérica da corporação e a estratégia de manufatura, segundo seus critérios e dimensões competitivas, e a localização na matriz volume e variedade.

O Escritório de Gerenciamento de Projetos deverá atuar na aplicação dos conceitos de gerenciamento de projetos dentro da organização, auxiliando os gerentes de projeto e os times da organização na implementação dos princípios, práticas, metodologias, ferramentas e técnicas do gerenciamento de projetos.

O envolvimento da alta direção e o envolvimento dos funcionários são necessários para que o processo de melhoria contínua seja acreditado por todos os que fazem parte da comunidade aeroportuária, onde comentários e sugestões devem ser considerados como ponto de partida para o desenvolvimento de projetos de melhoria, aliando motivação, desenvolvimento de competências e flexibilidade dos funcionários do aeroporto à excelência dos serviços prestados aos clientes.

O EPA deverá ser responsável pelo desenvolvimento de habilidades e competências de gerenciamento de projetos dentro da organização. Devendo desenvolver relatórios consolidados de projetos, definir métricas para supervisão dos projetos, comunicação entre as partes interessadas, treinamentos para os gerentes de projetos, ajuste da metodologia de gerenciamento de projetos que será adotada.

5.1. Estrutura Organizacional do EPA

Inicialmente, considerando as observações quanto à estruturação do Escritório de Projetos dentro de uma organização, deve-se adotar a proposta do Escritório de Projetos atuando para um Grupo de Clientes, entendendo que a administração aeroportuária possui uma estrutura organizacional funcional, cujo EPA deverá se integrar com as diversas áreas da administração. Assim, é possível buscar um melhor gerenciamento e comunicação com os clientes, agrupando projetos comuns na busca por um melhor gerenciamento e melhores relações. A princípio, a ideia poderia partir para a implantação do EPA com uma área de Suporte e Apoio ao Superintendente (Fig. 2), e sua formação se daria por uma composição de equipe multidisciplinar, variando de acordo com as premissas e restrições dos projetos, e alinhada com a determinada área.

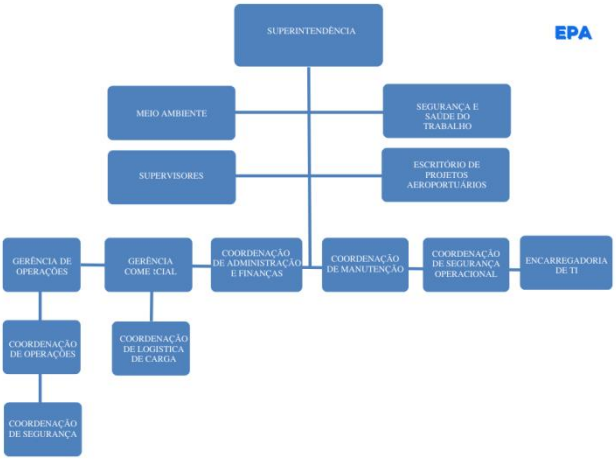


Figure 2 Estrutura Organizacional com a implantação do EPA na administração aeroportuária

Visando alcançar resultados a curto prazo, como forma de promover a integração das equipes com o gerenciamento de projetos a proposta de trabalho do EPA iniciará com projetos únicos por vez.

A proposta de EPA para implantação na administração aeroportuária de um aeroporto de médio porte não trata de uma equipe dedicada ao Escritório de Projetos; ela tem como estrutura organizacional formatada através de três comissões: Gestora, de Projeto e de Controle, podendo contratar especialista técnico para dar suporte às comissões.



Figure 3 Proposta para Estrutura Organizacional do Escritório de Projetos Aeroportuário

A proposta da Estrutura Organizacional para o EPA (Fig. 3) considera a proposta da Infraero quanto trata do acompanhamento de projetos – Gestores e fiscais operacionais e administrativo, que, nessa proposta, é representada pela Comissão de Gestão, Comissão de Controle, acrescida da Comissão de Projetos, além da ligação direta entre as comissões que proporciona uma maior facilidade de comunicação, já que melhora a agilidade na tomada de decisões.

A Comissão de Gestão será formada pelo Superintendente do Aeroporto – *sponsor* dos projetos de melhoria que serão desenvolvidos no aeroporto, representante(s) da área de desenvolvimento do projeto e áreas afins, sendo essa comissão responsável pelas tomadas de decisão quanto ao planejamento e execução dos projetos pelo EPA.

A Comissão de Gestão terá a responsabilidade de gerir os projetos, com autonomia para autorizar o início, suspensão e/ou cancelamento do projeto, quando achar conveniente, bem como solicitar uma priorização de um projeto em detrimento do outro, mesmo quando ambos estiverem em execução, a fim de buscar o alinhamento ao Mapa Estratégico da empresa.

A Comissão de Projetos será responsável pela captação das ideias para projetos de melhoria e desenvolvimento dos projetos aprovados pela Comissão de Gestão. Essa comissão será a responsável pela operacionalização do Escritório de Projetos. Esta será composta, inicialmente, pelo Coordenador de Projetos, designado pela Comissão de Gestão e um auxiliar técnico para apoio às atividades desenvolvidas pelo EPA. Esse Coordenador de Projetos deve ser um profissional com experiência na área de gerenciamento de projetos.

Para a função do Coordenador de Projetos da Comissão de Projetos, é necessário que o colaborador tenha um bom conhecimento da área de Gerenciamento de Projetos, não, necessariamente uma específica formação profissional, mas um conhecimento pessoal e técnico para a prática das atividades.

Para a execução de projetos que exigirem a contratação de um serviço, será designada uma relação com os fiscais desse contrato. E essa designação é formalizada através de Ato Administrativo, a ser emitido pelo gestor responsável pelo contrato.

Quanto ao papel da Comissão de Controle, essa terá a função de fiscalizar o desenvolvimento das atividades do EPA, a partir do processo de iniciação, planejamento, execução do projeto, monitoramento e controle, e encerramento, buscando sempre os objetivos que foram delineados, bem como a estratégia empresarial da Infraero.

A Comissão de Controle será designada pela Comissão de Gestão, devendo ser formada por uma equipe multidisciplinar, representada pela área idealizadora do projeto, a área de atuação onde o projeto será implantado, por representante da área de administração, segurança e saúde do trabalho e da área de manutenção e/ou engenharia, podendo ainda, ser convidado(s) profissionais de outras áreas de controle.

A Comissão de Controle deverá ter livre acesso a todas as informações, e contato direto com as demais comissões. Identificados desvios quanto ao ajuste do projeto, esses deverão ser registrados e tratados de forma que não comprometa o andamento projeto.

A opinião especializada tem a função de analisar as entradas para o desenvolvimento do projeto, podendo ser aplicadas a qualquer detalhe técnico e de gerenciamento durante o processo de desenvolvimento, fornecendo consultoria especializada ou preenchendo um papel específico, como instalação, personalização, treinamento ou suporte.

5.2. Procedimentos Operacionais do EPA

A proposta de funcionamento do EPA de melhoria para a administração aeroportuária foi estruturada levando em consideração o referencial teórico apresentado no trabalho, outros trabalhos relacionados com o tema da pesquisa e no estudo de caso efetivado no Aeroporto Internacional Augusto Severo. Diante disso, alguns pontos devem ser estabelecidos, tais como: método de captação, coleta, organização e registro das ideias para os projetos de melhoria, aprovação das ideias para realização do detalhamento, estruturação, planejamento, execução, monitoramento e controle do desenvolvimento dos projetos e encerramento dos projetos.

A relação dos métodos operacionais do EPA junto aos processos de iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle, e encerramento são apresentados através da Figura 4.

Segundo o PMI (2012), os projetos acontecem em decorrência de uma das seis necessidades ou demandas: demanda do mercado; necessidade empresarial; solicitação do cliente; avanço tecnológico; exigência legal; necessidade social.

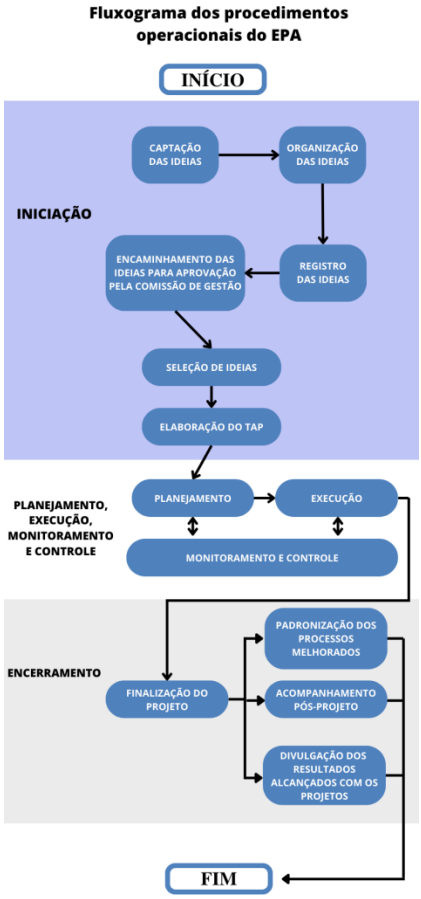


Figure 4 Fluxograma dos procedimentos operacionais do EPA.

A captação das ideias de melhoria pode ser apresentada de forma genérica ou específica. Caberá à Comissão de Projetos organizá-la e realizar um estudo de viabilidade para confirmar se o projeto é viável, analisar a probabilidade de êxito, examinar a viabilidade do projeto do projeto, analisar questões técnicas relacionadas ao projeto, se a tecnologia sugerida é viável, confiável e fácil de incorporar à atual estrutura tecnológica da organização.

O planejamento, execução, monitoramento e controle serão desenvolvidos com base nos conceitos apresentados no PMBOK (2012), e estarão sob a responsabilidade da Comissão de Projetos, que ficará responsável pela assessoria às equipes responsável pela execução do projeto, administrando a necessidade ou não da realização de treinamentos, visando ao alcance dos objetivos do projeto.

Dentro da etapa de monitoramento e controle, a Comissão de Projetos deverá desenvolver relatórios consolidados de fácil entendimento para apresentação à Comissão de Gestão. Os relatórios e métricas das metas, situação atual, performance e tendências dos projetos devem ser consolidados para que a administração tenha conhecimento do valor agregado dos projetos. Esse relatório deve conter: uma visão do todo; detalhamento via "drill drown"; relatórios intuitivos; e, relatórios customizados.

A fase de encerramento poderá incluir uma avaliação através de uma Matriz de Avaliação, contendo informações referentes a diversos aspectos a serem verificados nos projetos fechados, tais como: problemas detectados, aprendizados adquiridos, impactos gerados, necessidade de mudanças e resultados obtidos. Essa Matriz de Avaliação dará origem a um Relatório de Avaliação do Projeto, em que ficarão registrados os pontos positivos e negativos dos projetos, além das recomendações de melhoras.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entender o funcionamento administrativo da organização foi necessário, visto que a proposta implica, necessariamente, uma mudança da cultura organizacional, metodologia de execução dos processos, além dos possíveis obstáculos internos e externos que podem surgir no processo de implementação do EPA.

O processo de validação da proposta do EPA junto aos gestores da administração aeroportuária foi muito importante, a vivência dos participantes do *focus group* auxiliou, principalmente, na identificação dos possíveis obstáculos para implementação da proposta, na necessidade de ajustes na formação das comissões do EPA, e dos procedimentos operacionais julgados válidos dentro da melhoria da proposta.

Foi possível identificar, também, através da validação, a viabilidade para implantação do EPA demonstrada pela autoridade aeroportuária, sugerindo a apresentação da proposta em nível Regional. Para uma possível replicação da ideia em outros aeroportos de médio porte, ou ainda, de um maior porte, considerou-se que a estrutura organizacional é semelhante; com isso, buscou-se a eficiência na administração aeroportuária e no desenvolvimento de novos projetos de melhoria da gestão, além da melhoria do posicionamento dos aeroportos brasileiros em nível mundial.

Não há manual de implementação de Escritório de Projetos em organizações. Cada organização é diferente da outra; para isso, desenvolveu-se a proposta alinhada com a estratégia empresarial. A iniciação da implementação do EPA, através da realização de curto prazo e baixo custo, apresenta-se como essencial para a sobrevivência desse, fazendo com que os resultados alcançados motivem a organização para o desenvolvimento de novos projetos.

Referências

AUBRY, M., HOBBS, B., MULLER, R., BLOMQUIST, T.: Identifying forces driving PMO changes. Project Management Journal. v. 41, n. (4), 30-45, 2010.

CRAWFORD, J. K. The Strategic Project Office. – *Second Edition – Boca Raton: Taylor e Francis Group*, 2011.

CRAWFORD, L., HOBBS, B., TURNER, R. Project Categorization Systems: Aligning Capability with Strategy for Better Results. *Project Management Institute, Inc., Newtown Square*, PA, 2005.

DIETRICH, P; LEHTONEN, P. Successful strategic management in multiproject environment: reflections from empirical study. In: *Proceedings of 6th IRNOP conference, Turku, Finland*, 2004.

DIETRICH, P., LEHTONEN, P. Successful management of strategic intentions through multiple projects — reflections from empirical study: selected papers from the Sixth Biennial Conference of the International Research Network for Organizing by Projects. *International Journal of Project Management*, 23 (5), 386–391, 2005.

KERZNER, H. *Gestão de projetos:* as melhores práticas / Harold Kerzner; tradução Lene Belon Ribeiro. – 2. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2006.

MAGNÚSDÓTTIR, B. Project Management Office in International Organizations. A case study with main focus on how to successfully implement PMO and maintain it as a long term entity. *Master of Science Thesis for the Master's Program International Project*, 2012.

MEDEIROS, J. E. L.; MARTINELLI, José Carlos N. Cuidados necessários com a Aviação Civil. Panorama Profissional. ANPET, *Revista Transportes*, v. 8, n. (2), 2000.

PATAH, L. A.; CARVALHO, M. M. A, n. linhamento Estratégico de Estrutura Organizacional de Projetos: Uma análise de múltiplos casos. Gestão Produção, São Carlos, v. 16, n. (2), p. 301-312, 2009.

PROJECT MANGEMENT INSTITUTE (PMI). Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK) *5th Ed., Newtown Square, Pennsylvania*: 2012.

QUILTY, B. J.; CLIFFORD, S.; FLASCHE, S.; EGGO, R. M. Effectiveness of airport screening at detecting travellers infected with novel coronavirus (2019-nCoV). *Eurosurveillance*, v. 25, n. (5) 2020.

STANLEIGH, M. From Crisis To Control: New Standards For Project Management**.** *Ivey Business Journal: Improving the practice of management*, 2006.

UNGER, B. N.; GEMÜNDEN, H. G.; AUBRY, M. The three roles of a project portfolio management office: Their impact on portfolio management execution and success. *International Journal of Project Management*, 30 (5) , pp. 608-620, 2012.

AVALIAÇÃO TEMPORAL DA DINÂMICA DE OCUPAÇÃO ESPACIAL DO SOLO NAS ÁREAS DO ENTORNO DE AEROPORTOS REGIONAIS

Enzo Carmine Picchiello, Marcelo Xavier Guterres, Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira, Anderson Ribeiro Correia.
NAV Brasil Serviços de Navegação Aérea, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Universidade Federal de Goiás

*** Corresponding author e-mail address**: enzocp@hotmail.com

PAPER ID: SIT137

ABSTRACT

Os aeroportos regionais são componentes de infraestrutura imprescindíveis para o desenvolvimento econômico das regiões localizadas na área de influência do aeródromo. Portanto, estudar a dinâmica econômica dos impactos diretos, indiretos e induzidos devido a operação de um aeroporto regional é uma atividade essencial para avaliação dos investimentos públicos e privados. Nesta linha, a proposição do artigo é o desenvolvimento de um procedimento metodológico para avaliar temporalmente as modificações do uso do solo no entorno de aeródromos, por meio de técnicas de geoprocessamento. A compreensão do uso do solo nas adjacências do aeródromo pode permitir a estimação de proxys de desenvolvimento econômico, em função do tipo de uso: residencial, comercial ou industrial.

Keywords: Geoprocessamento; Ocupação do Solo; Aeroportos.

1. INTRODUÇÃO

Os aeroportos regionais são componentes de infraestrutura imprescindíveis para o desenvolvimento econômico das regiões localizadas na área de influência do aeródromo. Ainda, a integração entre as zonas interioranas e metropolitanas do território nacional (CARBALLO et al,2014).

Portanto, indubitavelmente, a estimação dos impactos econômicos fomentados pelas infraestruturas aeroportuárias do País são fundamentais para avaliação dos investimentos públicos e privados.

Ademais, ao estudar-se a dinâmica econômica dos impactos diretos, indiretos e induzidos devido a operação de um aeroporto regional, possibilita aos analistas inferirem quais são as principais variáveis exógenas envolvidas no processo de desenvolvimento econômico, que uma nova infraestrutura aeroportuária e os serviços de transporte aéreo trazem para uma determinada região.

Nesta perspectiva, diferentes abordagens de modelagem econômica podem ser empregadas para mensurar o efeito completo do investimento em aeroportos e sua operação. Classicamente, a principal abordagem é a Teoria da Matriz Insumo-Produto de Wassily Leontief. A análise de Insumo-Produto e´ recomendada pela *International Civil Aviation Organization*, ICAO, em suas diretrizes metodológicas denominadas *Economic Contribution of Civil Aviation* (ECCA), desenvolvidas para auxiliar os Estados a avaliar a contribuição econômica da aviação civil.

Porém, eventualmente, a Teoria da Matriz Insumo-Produto pode não ser aplicável para mapear, mensurar e analisar a interdependência entre produtores e consumidores de bens e serviços associados ao transporte aéreo ao longo de toda a sua cadeia de produção. Pois, a referida teoria necessita de um número elevado de estatísticas oficiais de diferentes indicadores macroeconômicos.

O fato destacado, pode ser acentuado para as localidades interioranas do país, onde os agentes municipais nem sempre possuem *bureaus* de registros de dados e informações de natureza econômica e socioeconômica. Logo, novas abordagens teóricas são essenciais para entendimento do fenômeno econômico em argumentação.

Portanto, partindo-se da hipótese da necessidade do emprego de novos modelos para mensurar os impactos econômicos da operação de um aeroporto regional, esta pesquisa tem por objetivo apresentar um ensaio científico, com uma proposição metodológica para medir a indução do desenvolvimento econômico no entorno dos aeródromos regionais.



Figure 1 Aeroporto de Chapecó/PR

Para tanto, o principal recurso metodológico a ser empregado e´ a disciplina de Geoinformática. De maneira geral, a Geoinformática utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento e obtenção de dados de imagens georreferenciadas. A Figura 1 destaca uma imagem georreferenciada.

A Figura 1, como exemplo, propicia uma interpretação atual do uso do solo em torno dos aeródromos. Piroli (1999) destaca que o uso sistemático de imagens possibilita o acompanhamento da evolução do uso e dos fenômenos que estejam ocorrendo na superfície.

Por esta lógica, a interpretação temporal das imagens das adjacências do entorno do aeródromo pode ser uma alternativa metodológica para inferir medidas indiretas do nível de atividade econômica devido a sua implantação e operação. A literatura destaca vários estudos de casos, nos quais alguns aeroportos regionais foram vetores de indução do desenvolvimento de atividades residenciais, comerciais e industriais.

Desta forma, ao aplicar-se técnicas de geoestatísticas em uma sequência de imagens é possível identificar as modificações temporais nas taxas de ocupação do uso do solo. Entre os diferentes indicadores possíveis de serem

medidos destacam-se: taxa de uso do solo por cobertura da vegetação; taxa de uso do solo por cobertura de edificações; taxa de uso do solo por cobertura de vias terrestres.

O indicador taxa de uso do solo por cobertura de edificações pode ser uma proxy importante para medir os impactos econômicos indiretos, derivados da implantação e operação de um aeroporto regional. Para tanto, é possível com modelos apropriados de Geoinformática avaliar o tipo de edificação, de acordo com as características do telhado em: residencial, comercial ou industrial.

Além do mais, em uma fase posterior é possível cruzar os resultados do geoprocessamento com dados financeiros de IPTU para estimar os efeitos econômicos. Por fim, o objetivo principal deste artigo consiste na proposição de um procedimento metodológico de Geoinformática, para estimar *proxys* de atividade econômica nas áreas do entorno de um aeródromo, por meio da interpretação temporal de imagens georreferenciadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O propósito desta seção consiste em sistematizar o procedimento metodológico delineado para alcançar o objetivo do artigo. Para tanto, as etapas da metodologia podem ser resumidas de acordo com a Figura 2.

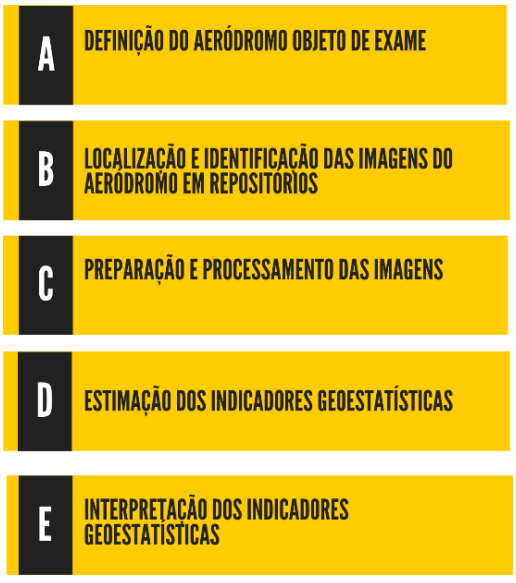


Figure 2 Fluxo Metodológico

A. Definição do aeródromo objeto de exame

Para este ensaio científico foi selecionado um aeroporto regional do estado de São Paulo, o Aeroporto Estadual de Marília (SBML). Visto a importância econômica do estado, cujo Produto Interno Bruto (PIB) representa 31,93% do PIB nacional. Os principais dados socioeconômicos da cidade de Marília são: População estimada em 219,66 mil de habitantes em 2012; PIB per capita 20,87 de reais em 2012; PIB de 4,59 bi de reais em 2012. A Figura 3 destaca o mapa de localização do município de Marília.

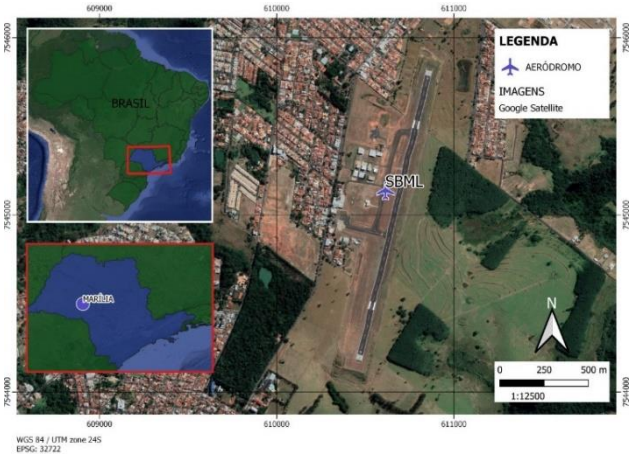


Figure 3 Aeroporto de Chapecó/PR

A Figura 4 exibe algumas informações técnicas do aeródromo SBML.



Figure 4 Informações técnicas do aeródromo SBML

B. Localização e identificação das imagens do aeródromo em repositórios

Segundo Moreira (1993), as imagens de geoprocessamento podem ser obtidas de diferentes formas: fotografias aéreas, scanners ou por meio de satélites.

No que diz respeito as imagens capturadas por satélites, estas são modificadas

por transformações matemáticas e armazenadas em forma de matrizes. Onde cada elemento da matriz corresponde a um pixel, [4] esclarece que o valor de um pixel corresponde à energia eletromagnética refletida ou emitida por uma fração de área da superfície terrestre capturada pelo satélite.

No atual estágio do desenvolvimento tecnológico, registram-se uma grande variedade de satélites orbitais que conseguem imagear a superfície do globo terrestre.

Destaque especial para os satélites da série Landsat, que registram e armazenam os dados da superfície da Terra de uma maneira repetitiva, metódica e sinóptica. A Figura 5 exibe os oito satélites da série lançados, todos com capacidade de registro de imagens multiespectrais.

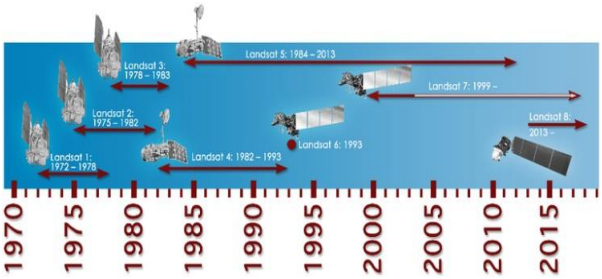


Figure 5 Série Landsat. Fonte: INPE.

Para análise proposta foram usadas as imagens dos satélites: Landsat 5 e Sentinel 2. Estas imagens são disponibilizadas para uso público no sítio eletrônico do U.S. Geological Survey (USGS, 2020), órgão norte-americano de pesquisas geológicas.

No que diz respeito, ao período de avaliação das modificações do uso do solo em torno do aeródromo de SBML, as imagens cobrem o intervalo de anos compreendidos entre 1999 e 2020. Para o ano de 1999 foi utilizado as imagens do Landsat 5 e para o ano de 2020 Sentinel 2.

As imagens do satélite Landsat 7 compõe o intervalo de anos entre 1999 e 2020, no entanto, em junho de 2003, o sensor forneceu imagens com falhas de processamento devido a um defeito no Scan Line Corrector (SLC). Por este motivo, as imagens do Landsat 7 não foram utilizadas.

C. Preparação e processamento das imagens

Selecionado o aeródromo objeto de investigação e suas respectivas imagens, o próximo procedimento metodológico consistiu na preparação das imagens para análise. Todas as imagens selecionadas para o estudo foram primeiramente reprojetadas para o Sistema de Referência de Coordenadas WGS 84/ UTM zone 22S EPSG:32722.

Na sequência foi realizado um processamento para a composição das bandas, que consiste na geração de imagens coloridas. Como exemplo a Figura 6 destaca as bandas de imagens disponíveis para satélite Landsat 5. De forma geral, foram adotadas duas composições de cores: vegetação e urbano.

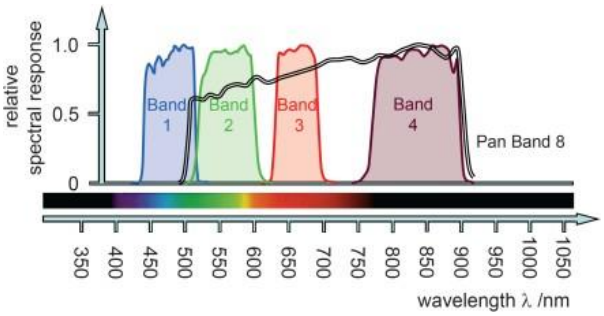


Figura 6 - Bandas Landsat 5. Fonte: INPE.

Para a composição de vegetação, os satélites Landsat 5 e Sentinel 2 colocam a banda do infravermelho no canal R (do inglês red). Logo, como a vegetação reflete quase que toda radiação infravermelha emitida pelo satélite, essa composição terá um vermelho mais vibrante. Por outro lado, na composição urbano, tomando-se como exemplo o satélite Sentinel 2, as bandas B12, B11 e B04 são colocadas nos canais R-G-B (red-green-blue), respectivamente. O resultado da referida combinação de bandas é a cor magenta para indicações de urbanização. Em outras palavras, as bandas colocadas nos canais refletirão essas cores se o sinal recebido pelo satélite tiver alta ocorrência.

A Tabela 1 informa as bandas utilizadas para cada tipo de composição em cada satélite:

Satélite	R	G	B	Composição
Landsat	B4	B3	B2	Vegetação
5	B7	B5	B3	Urbano
Sentinel	B08	B04	B03	Vegetação
2	B12	B11	B04	Urbano

Tabela 1 - Bandas por tipo de satélite

Outro aspecto importante é que as bandas do Landsat 5 citadas possuem resolução espacial igual a 30 m, ou seja, cada pixel da imagem possui a medida de lado igual a este valor. Para o Sentinel, as bandas B08, B04 e B03 possuem resolução espacial de 10 m. Enquanto, as bandas B12 e B11(faixa do SWIR) possuem resolução espacial de 20 m. Em síntese, as composições geradas pelo Landsat possuem resolução espacial igual a 30 m. Em contrapartida, para o Sentinel a composição vegetação possui resolução de 10 m e a composição urbano 20 m.

As Figuras 7 e 8 ilustram exemplos de composições de vegetação e urbano, respectivamente.

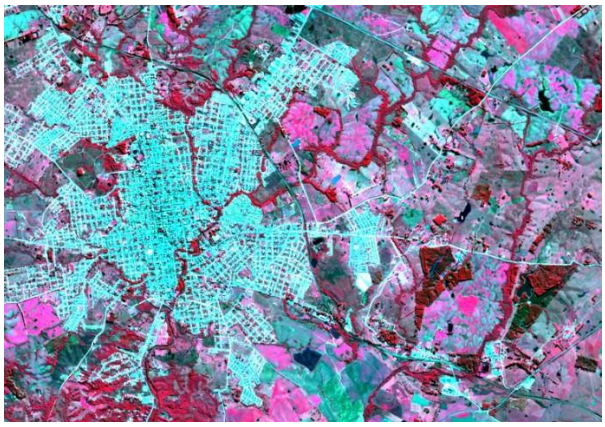


Figura 7 - Composição vegetação

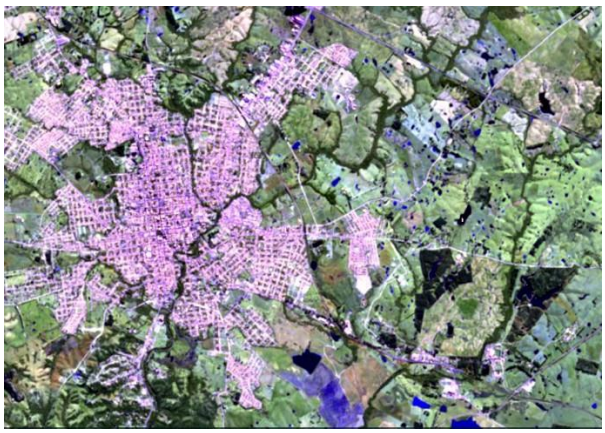


Figura 8 - Composição urbano

Após o procedimento de geração de imagens coloridas foi definida uma área circular com raio de 5 km no entorno do aeroporto para ser analisada. A Figura 9 apresenta a área circular no entorno SBML.

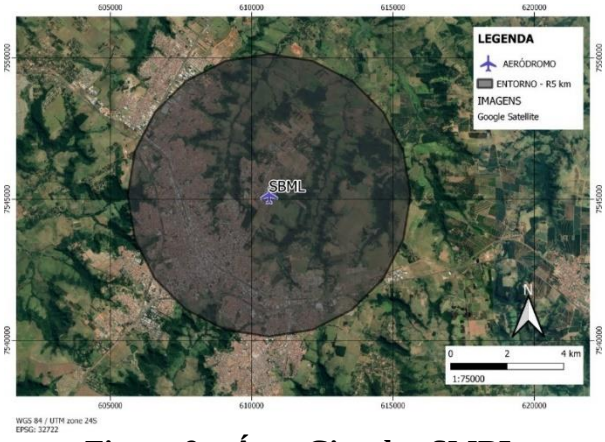


Figura 9 – Área Circular SMBL

A sequência dos procedimentos metodológicos supracitados foi aplicada somente para as imagens do ano de 1999 (Landsat 5) e do ano 2020 (Sentinel) para o aeródromo de SBML.

D. Estimação dos indicadores geoestatísticos

Com as composições geradas pela aplicação do procedimento metodológico da seção anterior, na continuidade foi aplicada a ferramenta de classificação Dzetsaka do software QGIS. O Resultado foram dois tipos de classificação:

- Vegetação e não vegetação;
- Urbano e não urbano.

Para tanto, foi elaborado um arquivo de dado geoespacial em forma de vetor (*shapefile*) para o treinamento do algoritmo de classificação da imagem processada.

No arquivo do tipo vetor são desenhadas as amostras para cada tipo de classe, como exemplo tem-se a figura 10.

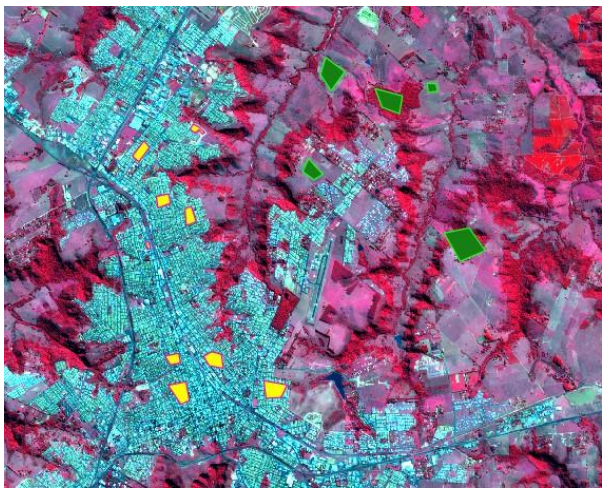


Figura 10 – Arquivo vetor para treinamento das classes

Neste caso os vetores em verde indicam onde o observador classificou como vegetação para o treinamento, em amarelo onde se verificou a presença de cobertura do solo que não seja vegetação.

Para as composições em questão (vegetação e urbano) efetuou-se a classificação binária. Para o caso da vegetação a classificação ficou sendo entre onde ocorre a vegetação e onde não ocorre vegetação. Analogamente para a classificação do urbano. É importante destacar que neste ensaio científico não foi realizado o processo de avaliação da acurácia do processo de treinamento do algoritmo de aprendizado. Porém, para outras aplicações futuras da metodologia proposta, esta´ sendo avaliada a melhor forma de implantação deste procedimento.

E. Interpretação dos indicadores geoestatísticos

Depois do algoritmo de classificação treinado, o produto do processamento e´ um arquivo metadado com as classes das composições. Onde um dos atributos do arquivo metadado é a área total ocupada por cada uma das classes em termos de pixels. Em outros termos, para o caso afirmativo (existe vegetação ou existe urbano) e para o caso negativo (não existe vegetação ou não existe urbano) será calculada a área total do vetor produzido.

Em decorrência, o indicador geoestatístico área proporcional de cada classe é estimado com relação a zona analisada. É importante destacar que a área total (Atot) da zona de busca (raio 5 km) não é geometricamente circular, sendo um polígono segmentado. Para o cálculo desta área total é usada um ferramenta específica disponível no QGIS. O resultado estimado foi de aproximadamente Atot = 77.292.697m2.

O resultado desta etapa do procedimento metodológico é área proporcional de cada classe, para cada uma das composições analisadas (1999 e 2020), ou seja, o uso do solo no entorno do aeródromo de SBML nos anos de 1999 e 2020.

A taxa será o valor dessas áreas divididas pela área total de observação:

$$\text{taxa (\%)} = \frac{A_{vetor}}{A_{tot}} \quad (1)$$

Onde, Avetor é a área total do vetor, gerado para classificação, para cada caso (afirmativo e negativo).

3. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da proposta metodológica em curso, para o estudo de caso do aeródromo de SBML. Na ordem, a Figura 11 apresenta a composição de vegetação do entorno do aeródromo de SBML para o ano de 1999. Na sequência a Figura 12 apresenta a composição urbana do entorno do aeródromo de SBML para o ano de 1999.

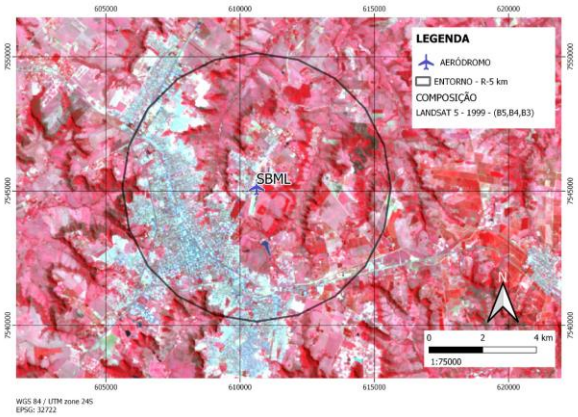


Figura 11 – Composição vegetação – Landsat 5 – 1999

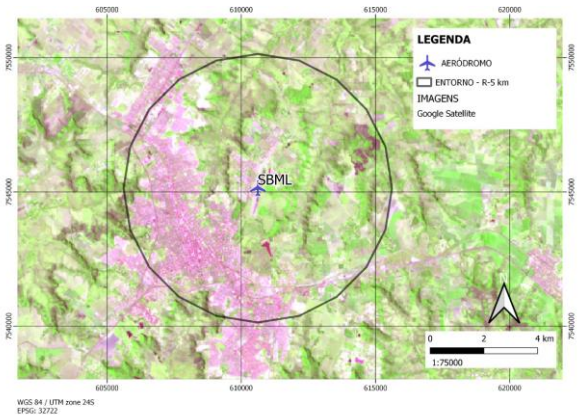


Figura 12 – Composição urbano – Landsat 5 – 1999

No que diz respeito aos resultados das composições para o ano de 2020, a Figura 13 apresenta a composição vegetação com as bandas do satélite Sentinel 2. Por outro lado, a Figura 14 apresenta a composição urbana com as bandas do satélite Sentinel 2.

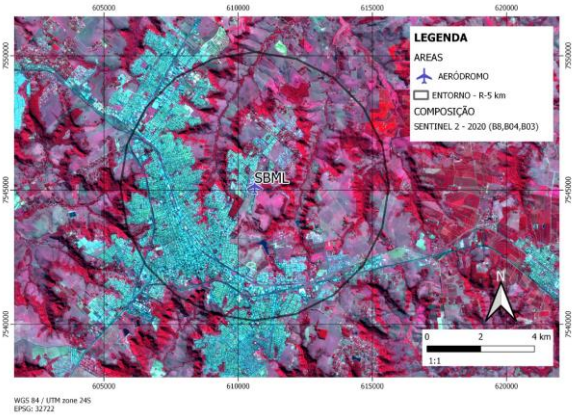


Figura 13 – Composição vegetação – Sentinel 2 – 2020

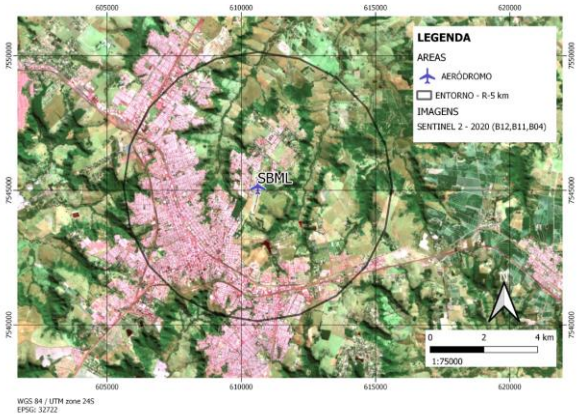


Figura 14 – Composição urbano – Sentinel 2 – 2020

Após o processamento das imagens em composições, foi realizado o processo de classificação Dzetsaka. Assim, as Figuras 15 e 16 apresentam os resultados da classificação Dzetsaka para o ano de 1999.

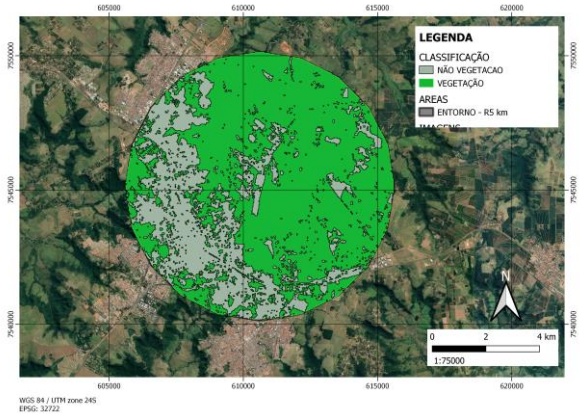


Figura 15 – Classificação Dzetsaka – vegetação – 1999

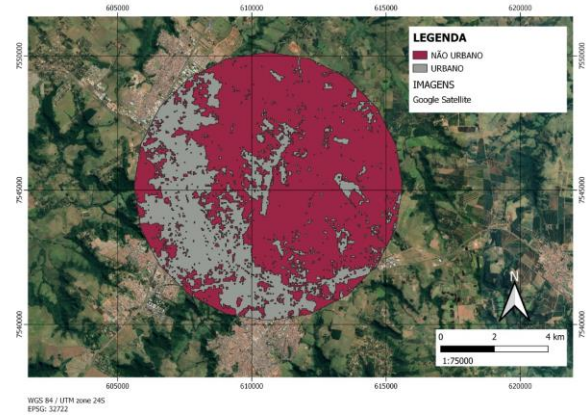


Figura 16 – Classificação Dzetsaka – urbano – 1999

Por outro lado, as Figuras 17 e 18 apresentam os resultados da classificação Dzetsaka para o ano de 2020.

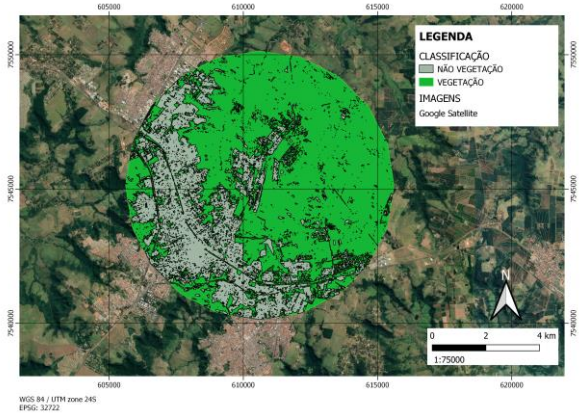


Figura 17 – Classificação Dzetsaka – vegetação – 2020

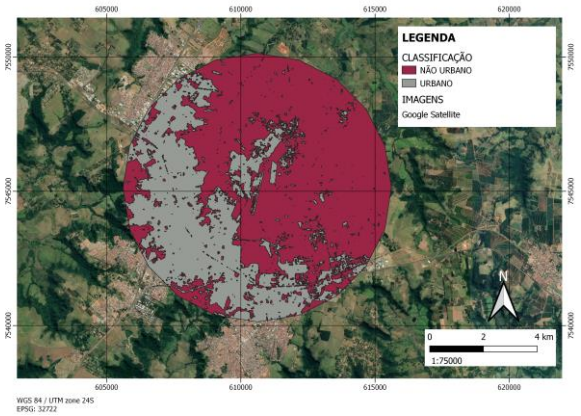


Figura 18 – Classificação Dzetsaka – urbano – 2020

Com os processamentos realizados, elaborou-se a Tabela II que exibe os resultados dos indicadores geoestatísticos estimados.

Ano	C	P (km)	N (km)	Taxa P.	Taxa N.
1999	Vegetação	52,57	24,70	68%	32%
	Urbano	27,13	50,14	35%	65%
2020	Vegetação	51,68	25,62	67%	33%
	Urbano	29,01	48,29	38%	62%

Tabela 2 – Análise da classificação KM

onde na Tabela 2 tem-se as seguintes legendas: Comp = Composição; P = Afirmativo; N = Negativo;

Na tabela 2 pode-se observar que para o intervalo de anos analisado, 1999 a 2020, houve uma diminuição de 1%, (68% em 1999 para 67% em 2020) na taxa da composição vegetação. Por outro lado, para a taxa da composição urbano verificou-se um aumento em torno de 3% (35% em 1999 para 38% em 2020).

4. CONCLUSÕES

A reduzida variação percentual dos indicadores geoestatísticos do uso do solo nas adjacências do aeroporto de SBML, entre os anos de 1999 e 2020, possivelmente indica que a dinâmica do uso do solo encontra-se em um processo estacionário. Fato corroborado, quanto atenta-se para o ano em que o aeródromo foi inaugurado 1938.

Em resumo, o procedimento metodológico apresentado indica que a análise de geoprocessamento (ou geoinformação) do entorno do aeroporto de Marília não teve uma grande mudança ou densificação no seu entorno.

Outro aspecto que foi observado, é que no entorno do aeroporto de SBML existem áreas com declividades acentuadas, indicando que não existe possibilidade de haver um avanço nessas áreas.

Um ponto desfavorável da metodologia remete a falta de imagens georreferenciadas para períodos mais remotos. O que limita o seu uso para avaliar aeroportos mais antigos em operação.

Por outro lado, o procedimento metodológico apresenta potencial para ser explorado para o acompanhamento de novos investimentos aeroportuários, como forma de acompanhar a dinâmica das modificações do uso do solo temporalmente.

Estudos futuros sobre o tema podem analisar outros aeroportos da malha aérea brasileira, levando em considerações outros dados que possam indicar áreas no entorno que não poderão expandir. Como por exemplo, grandes declividades, áreas de preservação ambiental, entre outros.

Para o caso em que os aeroportos apresentarem taxas de variação elevada do uso do seu entorno, é possível pelo procedimento metodológico descrito obter outras informações como por exemplo, a indicação da direção que houve maior desenvolvimento (ou ocupação).

5. REFERÊNCIAS

ASSAD, Eduardo Delgado; SANO, Edson Eyji. Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. 1998.

CARBALLO-Cruz, Francisco, and Vânia Costa. "Success factors of regional airports: The case of Oporto airport." Tourism & Management Studies 10.1 (2014): 37-45.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 2020, acessado: 01 jun. 2020. [Online]. Disponível em:

http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat

MOREIRA, Maurício Alves. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. UFV, 1993.

PIROLI, Edson Luís; PEREIRA, Rudiney Soares. Geração de imagem georreferenciada do município de Santa Maria utilizando imagem de satélite e sistemas de informações geográficas. Ciência Rural, v. 29, n. 3, p. 475-478, 1999.

USGS, USGS - Science for a changing world, United States Geological Survey, Washington, EUA, 2020, acessado: 01 jun. 2020. [Online]. Disponível em: https://www.usgs.gov/

Avaliação da Irregularidade Longitudinal em Pavimentos Aeroportuários e Pistas Semi Preparadas

Livia Fortes Merighi, Cláudia Azevedo Pereira e José Antonio Schiavon
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

*** E-mail autor correspondente**: livia.merighi@gmail.com

PAPER ID: SIT167

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do efeito da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários convencionais e em pistas semi preparadas. A falta de manutenção nas pistas aeroportuárias pode ocasionar acidentes ou incidentes aéreos. Durante as operações de pouso e decolagem, os pneus das aeronaves encontram-se em elevados níveis de tensão e possíveis desníveis da superfície podem contribuir para danos as aeronaves, aumento da fadiga nos trens de pouso, bem como a perda de estabilidade direcional da aeronave, aumentando assim as possibilidades de acidentes ou incidentes. A irregularidade longitudinal é um parâmetro funcional responsável pela qualidade ao rolamento. A Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC), órgão responsável por normatizar e supervisionar as atividades de aviação civil no Brasil, regulamenta por meio do documento RBAC 153 a necessidade de se avaliar a irregularidade longitudinal através do parâmetro *International Roughness Index* (IRI) em pistas pavimentadas. O IRI quantifica os desvios da superfície apresentando resultados em m/km. Já nos Estados Unidos, além do IRI, o *Boeing Bump Index* (BBI) e *Runway Roughness Index* (RRI) são índices também preconizados pela *Federal Aviation Administration* (FAA), agência americana que regula todos os aspectos da aviação civil nos Estados Unidos, uma vez que considera além dos desvios de superfície, o comprimento e amplitude da onda, ou seja, desvio existente. Além destes dois parâmetros, neste estudo é abordado o conceito de pista semi preparada e também como estes índices podem ser avaliados em pistas não pavimentadas, porém, com requisitos mínimos para atendimento a aeronave de projeto. Portanto, o presente estudo aborda estes índices de qualidade de rolamento cuja finalidade é garantir operações com segurança.

Palavras-chave: Pavimento Aeroportuário, Irregularidade Longitudinal (IRI), *Boeing Bump Index*, *Runway Roughness Index* (RRI), Pistas Semi Preparadas.

1. INTRODUÇÃO

Os índices de condição superficial são de grande importância no cenário das operações aeroportuárias, onde a falta de manutenção nas pistas pode contribuir para ocorrência de acidentes ou incidentes aéreos.

Durante o processo em que a aeronave se encontra em contato com o pavimento, a existência de possíveis desníveis da superfície pode resultar no aumento da solicitação dos trens de pouso da aeronave podendo impactar na segurança operacional.

Assim, este trabalho apresenta um estudo das anomalias representadas pelos desvios da superfície, caracterizados pela irregularidade longitudinal (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI) e o *Runway Roughness Index* (RRI) em pistas pavimentadas e semi preparadas, parâmetros que visam atender de maneira adequada a segurança e conforto ao rolamento.

2. AVALIAÇÃO FUNCIONAL DO PAVIMENTO

A avaliação funcional do pavimento tem como função promover características que influenciam na qualidade e segurança ao rolamento. Como parte da avaliação funcional do pavimento, os desvios da superfície que possuem aspectos importantes além do conforto, como a segurança mecânica das aeronaves nas operações de pouso de decolagem, maximizando a resposta dinâmica da aeronave e minimizando seu desempenho.

2.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL (IRI)

A irregularidade longitudinal, também conhecida como *International Roughness Index* (IRI), é parâmetro importante atrelado ao conforto e qualidade ao rolamento. Conforme definido pela ASTM E 867 (ASTM, 2020), a mesma é formada pelos desvios da superfície que podem afetar a dinâmica dos veículos assim como drenagem superficial da via influenciando no conforto e segurança do veículo (Merighi, 2017).

Ao citar o termo IRI, deve-se ressaltar que se trata de medida da amplitude média das vibrações de massa suspensa em sistema massa-mola-amortecedor padronizado, diferente, portanto, do conceito de "irregularidade longitudinal", que corresponde aos desvios do perfil real em relação a um perfil suave onde IRI = 0.

A irregularidade pode causar custos operacionais nos veículos, assim como custos na estratégia de manutenção.

Alguns indicadores da condição do pavimento através da avaliação da irregularidade são listados na Figura 1. Conforme observado nesta figura, algumas anomalias podem contribuir para a presença da irregularidade longitudinal, tais como corrugação, patologia de origem estrutural, depressão, desagregação, escorregamento, inchamento, assim como trincamentos longitudinais e transversais que possuem origem funcional (Roginski, 2012).

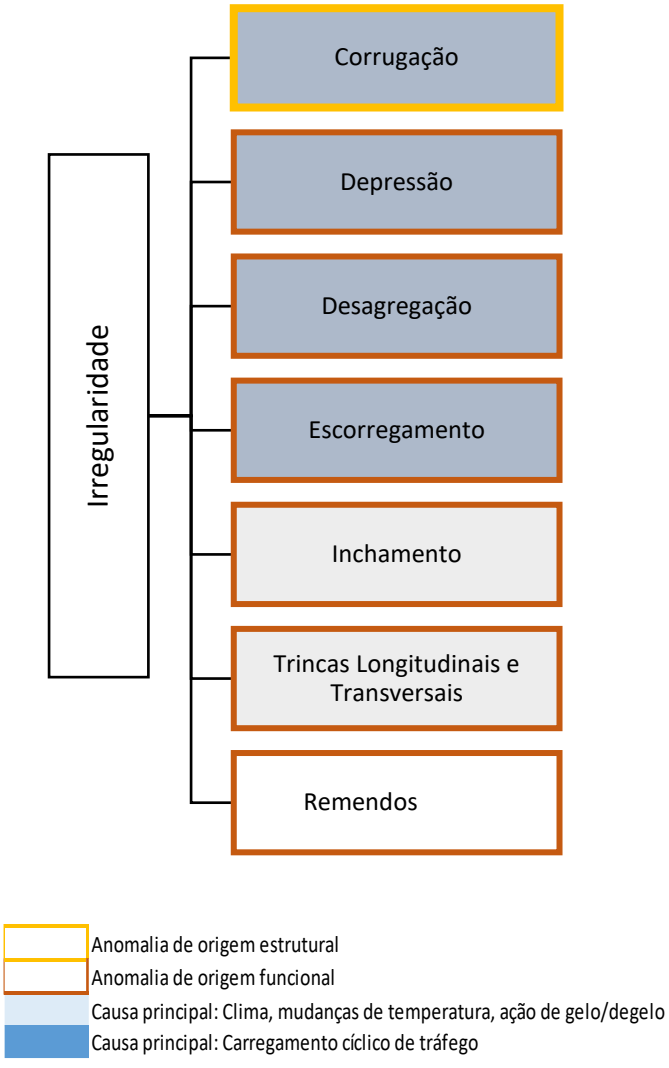


Figura 1 Indicadores de condição dos pavimentos aeroportuários. Fonte: Junior *et al.* (2018).

Vale ressaltar que patologias tais como corrugação, depressão, desagregação e escorregamento são oriundas do carregamento cíclico do tráfego, enquanto as patologias inchamento e trincamento podem ocorrer devido às mudanças climáticas (Roginski, 2012).

A Figura 2 apresenta anomalia que ilustra a irregularidade longitudinal tal como corrugação.

A irregularidade em pistas de pavimentos aeroportuários pode aumentar a fadiga dos componentes da aeronave, assim como reduzir a ação de frenagem e causar vibrações na cabine de controle da aeronave levando à dificuldade de manipulação de seus controles (Merighi, 2017).

A configuração da aeronave, tais como os espaçamentos do trem de pouso na longitudinal (entre o trem de pouso de "nariz" e o principal), costumam variar dependendo do porte de aeronave podendo chegar a 30 m, sendo que quando a mesma se encontra em altas velocidades, comprimentos de ondas de aproximadamente 90 m podem causar danos significativos à ela (Merighi, 2017).

Desta forma, quando a aeronave se depara com comprimentos de onda longos, pode-se adicionar uma carga dinâmica de 30% a 40% ao trem de pouso principal podendo refletir também no trem de pouso de nariz, o que pode gerar um acidente ou incidente quando necessário abortar uma decolagem (Merighi, 2017).

Vale ressaltar que quando a irregularidade possui comprimentos de onda curtos, poderá resultar em choque de cargas devido ao tempo exíguo para reação da suspensão dos pneus, conforme apresentado na Figura 3.



Figura 2: Irregularidade Longitudinal através da anomalia corrugação. Fonte: Primeira autora.



Figura 3: Quebra mecânica do trem de pouso. Fonte: Roginski (2012).

Os parâmetros mínimos para os pavimentos aeroportuários no Brasil são estabelecidos pelo Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) nº 153, onde a irregularidade longitudinal é abordada através do item 153.205f, o qual preconiza que este parâmetro em pavimentos existentes, assim como novos deve ser menor ou igual a 2,5 m/km reportados a cada 200 m. Essa medida deve ser realizada ao longo de toda a extensão da pista a 3 m do eixo de ambos os lados e se necessário, a 6 m também de acordo com a classificação do código do Aeródromo, onde a frequência para este levantamento é estabelecida em função da média de pousos diários de aeronaves de asa fixa com motor à reação, na cabeceira predominante, no último ano (ANAC, 2021).

Alguns estudos mencionam que a utilização da irregularidade longitudinal (IRI), índice que é baseado na resposta do modelo vibracional de um quarto de carro, não seria adequado para o modal aeroportuário, devido às velocidades durante operações de pouso e decolagem, onde a aeronave trabalha com velocidades aproximadas de 185 km/h, divergindo do modal rodoviário, além deste parâmetro não considerar os comprimentos de onda críticos e suas amplitudes que podem impactar de forma direta nas operações (Souza, 2021; FAA, 2021).

Ainda dentro dos parâmetros funcionais de irregularidade, também tem sido bastante utilizado o *Boeing Bump Index* e *Runway Roughness Index* que serão abordados nos próximos itens.

2.2 BOEING BUMP INDEX (BBI)

O método da Boeing, *Boeing Bump Index* (BBI), é um método utilizado nos Estados Unidos e preconizado pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO) e *Federal Aviation Administration* (FAA) através do documento AC 150/5380-9, o qual faz parte dos parâmetros funcionais de conforto e qualidade ao rolamento em pistas de pouso e decolagem (FAA, 2009).

O método surgiu devido a reclamações das companhias aéreas a respeito das irregularidades nas pistas aeroportuárias, sendo que em meados de 1968 foi dada uma ênfase maior por causa da situação da pista de pouso e decolagem (PPD) em *Addis Ababa* na Etiópia, onde tinha-se diversas reclamações dos pilotos. Em vista disso, foi identificado e estudado o efeito da irregularidade nas PPDs, e observado que de acordo com a amplitude de onda e velocidade das aeronaves, poderia impactar resultando em danos a aeronave. Os resultados desse estudo motivaram a fabricante Boeing a desenvolver um método baseado na verificação de uma única onda e espaços limitados conhecidos como *Boeing Runway Roughness Criteria* (Merighi, 2017).

O método da Boeing consiste em traçar, a partir de uma linha virtual entre dois pontos apresentando elevação longitudinal, a verificação dos desvios em relação à superfície, denominado como "*bump height*", verificando a altura da onda como desvio máximo versus o comprimento de onda comparando com um critério de aceitação (Boeing, 1995). A Figura 4 apresenta a irregularidade através do método da Boeing.

Vale ressaltar que o método da Boeing foi desenvolvido e é utilizado em pistas pavimentadas, seja com revestimento de

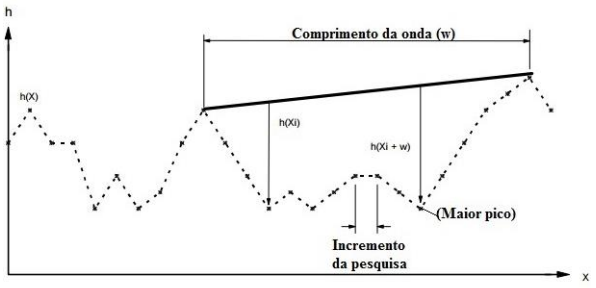


Figura 4 Irregularidade método Boeing. Fonte: Adaptada de Boeing (1995).

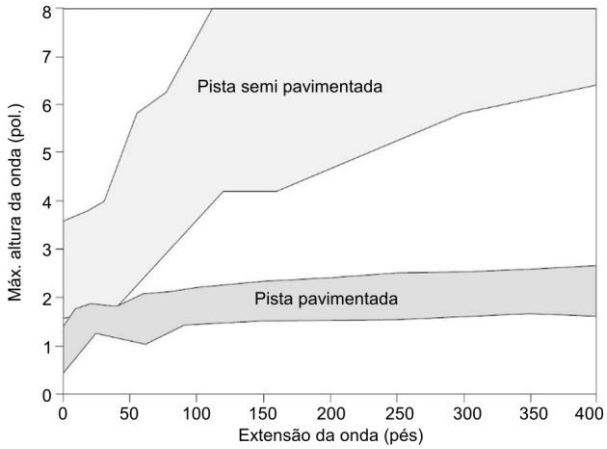


Figura 5 Limite de irregularidade do método Boeing. Fonte: Adaptada de Boeing (1995).

concreto asfáltico ou de concreto de cimento Portland, assim como para pistas semi preparadas ou sem preparação alguma, item que será abordado mais a frente neste estudo (Figura 5) (FAA, 2009).

Para o ensaio, a FAA recomenda que o levantamento da irregularidade na linha de eixo, a 3,05 m de cada lado do eixo, assim como dependendo do porte da aeronave que opera no aeródromo, a 5,22m do eixo em ambos os lados (FAA, 2009).

Na Figura 6, apresenta-se o limite de irregularidade pelo método da Boeing para pistas pavimentadas e semi preparadas. Nas pistas semi preparadas, é possível observar uma menor rigidez nos parâmetros necessários.

Portanto, o método em questão considera comprimentos de onda de 0,5 m a 120 m, onde comprimentos de onda superiores a 120 m não contribuem com a resposta dinâmica da aeronave. É importante mencionar que

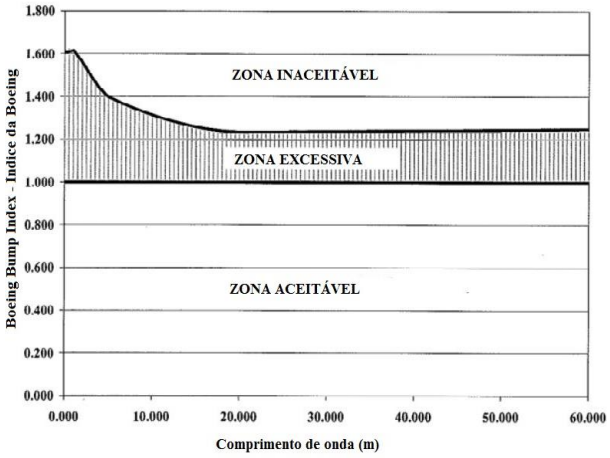


Figura 6 Limite de irregularidade do método Boeing. Fonte: Adaptado de Olidis (2013).

comprimentos de ondas maiores podem não ser visíveis a olho nu (FAA, 2009; Merighi, 2017).

O BBI é determinado pelo cálculo da taxa de altura dos picos com o limite de altura de pico para cada comprimento de onda, onde se o índice for inferior a 1 é aceitável (FAA, 2009).

Neste método, considera-se que, para a zona aceitável pode ser realizado o monitoramento, enquanto para a zona excessiva, é necessário reparo imediato e caso o BBI se encaixe na zona inaceitável poderá resultar no fechamento da pista para as operações das aeronaves (Boeing, 1995).

Como limitação ao parâmetro BBI em PPD, vale ressaltar que com base nas simulações computacionais através do *software ProFAA*, o método identifica somente eventos isolados. Contudo, os eventos sucessivos de irregularidade longitudinal são os mais prejudiciais para aeronave (Souza, 2021).

Complementando este estudo, foi observado que para as velocidades de operação nas pistas de pouso e decolagem (aproximadamente 185 km/h), comprimentos de onda equivalentes a 73 metros seriam críticos às operações, enquanto para pistas de taxi que operam com velocidades aproximadas de 37 km/h, ainda que o método tenha sido desenvolvido para pistas de pouso e decolagem, o comprimento de 15 metros poderia impactar de forma significativa na operação (Souza, 2021).

Desta forma, é importante mencionar a importância do monitoramento dos comprimentos de ondas em pistas de taxis que podem não ser capturados pelo IRI, porém, podem causar resposta dinâmica excessiva às aeronaves (Souza, 2021).

2.3 RUNWAY ROUGHNESS INDEX (RRI)

O *Runway Roughness Index* (RRI) é um índice americano desenvolvido recentemente pela área de pesquisa e tecnologia do FAA utilizando como base o BBI, *Pilot Subjetive Rating* (PSR), ou seja, a nota subjetiva avaliada pelos pilotos, assim como a resultante do valor da raiz quadrada média ponderada da aceleração vertical – WtRMS (FAA, 2022).

Estas informações foram analisadas através do simulador de dados no Centro Aeronáutico *Mike Monroney* (MMAC) localizado na cidade de Oklahoma e validadas com dados coletados em diversos aeroportos utilizando equipamentos tais como *inertial profiler*, o qual possui 3 sensores tais como laser, sensor de velocidade e acelerômetro para verificar os desvios de superfície, assim como *rolling inclinometer profilers*.
Também foram utilizados acelerômetros instalados na aeronave Boeing (B)727 da FAA enquanto operava em uma pista ativa, conforme observado na Figura 7.

O parâmetro RRI é obtido por meio de correlação com o PSR, assim como de dados obtidos dos desvios de superfície através dos equipamentos mencionados acima e também, de dados de aceleração coletados através do B727 calculando a resultante do valor da raiz quadrada média ponderada da aceleração vertical, obtido na estação piloto adaptado para o modelo de aeronave mais utilizado (B737) usando o *software ProFAA*, assumindo uma velocidade de 100 nós (185 km/h), multiplicada por um fator de 0,378, de forma a permitir uma correlação entre o RRI com o BBI (FAA, 2021).

O índice RRI é similar ao BBI quando verificado os desvios da superfície do pavimento, porém, o RRI não permite obter a localização exata de anomalias do pavimento como o índice BBI, ele apresenta os locais de eventos de aceleração que seriam experimentados pelo piloto em uma aeronave, com um comprimento de onda curto (FAA, 2021).

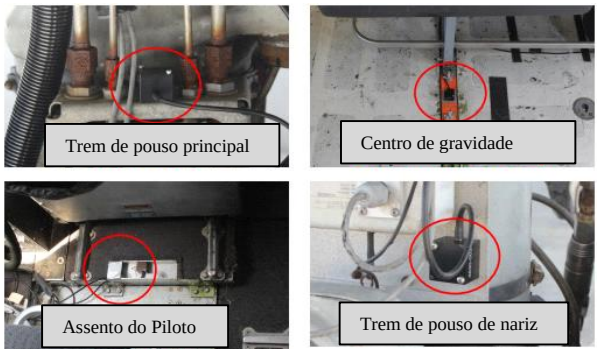


Figura 7 Acelerômetro no B 727. Fonte: Adaptado de Larkin *et al*. (2018).

Ademais, foi identificado que o RRI é para uso em pistas de pouso e decolagem, não sendo aplicável para *taxiways* ou pátios de estacionamento onde as velocidades operacionais típicas são inferiores a 185 km/h (FAA, 2021).

É importante ressaltar que o RRI não é um índice aplicável para aceitação de qualidade de construção, sendo recomendado pelo FAA que o mesmo seja implementado diretamente no *ProFAA* em conjunto com o BBI, uma vez que o BBI apresenta os desvios existentes no pavimento, enquanto o RRI demonstra o impacto da aceleração devido à condição total do pavimento (FAA, 2021).

O monitoramento da rugosidade deve ser realizado através de registro dos perfis de pista com equipamentos adequados. Os valores dos índices são divididos em três categorias: aceitável, excessivo e inaceitável, onde a escala foi desenvolvida para o BBI e adotada para o RRI conforme AC 150/5380-9 do FAA (FAA, 2021).

A Tabela 1 apresenta os resultados do estudo realizado pela FAA para limites de RRI assim como BBI. Observa-se que valores considerados como excessivos demandam ações corretivas, porém, a pista pode permanecer operacional. Enquanto se uma pista obtiver classificação inaceitável, devem ser cessadas as operações até que as ações de manutenção tenham sido realizadas de forma a evitar danos à aeronave.

Desta forma, o estudo realizado pelo FAA permitiu observar uma correlação entre o RRI, BBI e outros índices. Onde foi determinado que o RRI seria mais um índice de aceleração do que um índice de pavimento (FAA, 2021).

Tabela 1 Limites RRI e BBI. Fonte: FAA (2021).

Índice	Valor máximo aceitável/limites	Comentários
BBI (evento único de onda)	1,5	Inaceitável quando >1,5
	1,0	Excessivo quando >1
	0,75	Excessivo quando >0,75
Índice de rugosidade (BBI/RRI)	0,37–0,75	Deverá ser realizado o monitoramento
	0–0,37	Manutenção preventiva, nenhuma ação é requerida.

3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE IRREGULARIDADE (IRI, RRI E BBI)

O IRI pode ser calculado por meio do programa *ProFAA* e é um índice padrão utilizado na análise da irregularidade longitudinal em rodovias. De acordo com a FAA, o IRI não deveria ser utilizado como parâmetro único para avaliação de irregularidade do pavimento aeroportuário, conforme observado na Figura 8 (FAA, 2021).

Ao comparar o IRI com o RRI (Figura 9), observa-se que um IRI aproximadamente de 225 polegadas/milhas (3,6 m/km), valor superior ao limite preconizado pela ANAC de 2,5 m/km, resultaria em um RRI de aproximadamente 0,41, onde a Tabela 1 indica a realização somente de monitoramento deste trecho, enquanto pelo IRI deveria haver ação corretiva.

Em contrapartida, quando analisado IRI *versus* BBI, um IRI equivalente a 170 polegadas/milhas (2,7 m/km), índice superior ao preconizado pela RBAC 153, sendo necessária ação corretiva, enquanto o BBI equivaleria a 0,55 e estaria em uma zona de monitoramento.

A Figura 10 demonstra que embora exista uma tendência linear entre o BBI e RRI, os índices não são iguais, porém, existe uma correlação linear entre eles.

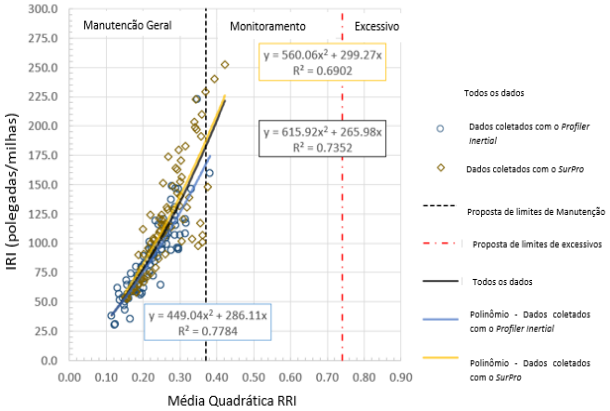


Figura 8: IRI versus RRI. Fonte: modificado de FAA (2021).

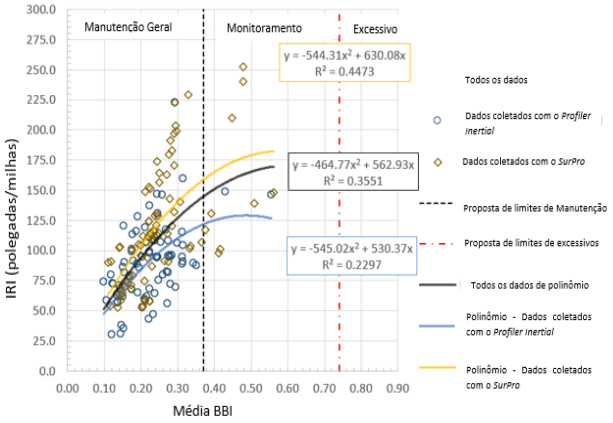


Figura 9: IRI X BBI. Fonte: modificado de FAA (2021).

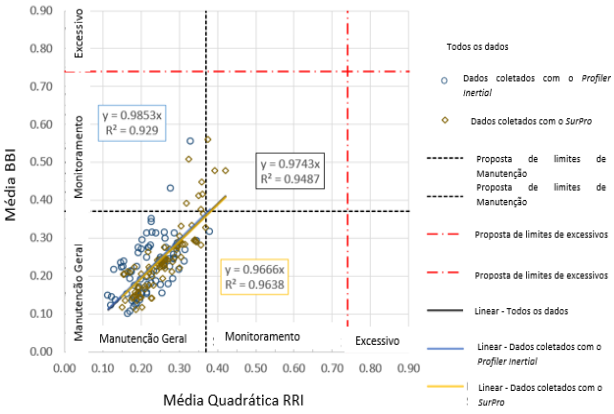


Figura 10: BBI versus RRI. Fonte: modificado de FAA (2021).

Portanto, o FAA sugere a utilização de mais de um índice para avaliação dos desvios de superfície nos pavimentos aeroportuários, assim como alocação dos recursos necessários para correção da patologia (FAA, 2021).

4 PISTAS SEMI PREPARADAS

Apesar de o transporte aéreo auxiliar na locomoção de passageiros e cargas, grande parte do planeta não tem acesso as pistas pavimentadas. Portanto, para o desenvolvimento de critérios da operação, é importante a definição de índices e parâmetros mínimos de forma a garantir estas que as operações em pistas semi preparadas sejam seguras.

As pistas semi preparadas são caracterizadas por pistas que não possuem a estrutura de uma pista pavimentada, porém, são livres de detritos (debris) e/ou obstruções. Elas têm sido utilizadas pela aviação militar desde a segunda Guerra Mundial, onde a aeronave deve passar por ajustes de fuselagem, entre outros para atuar neste tipo de pista de forma a evitar danos a aeronave (Hansen, 2002).

A irregularidade na superfície das pistas, seja ela pavimentada ou semi preparada, pode resultar na perda direcional do controle das aeronaves podendo comprometer a estrutura da aeronave, assim como no desgaste excessivo dos pneus e maior consumo de combustível (ICAO, 2002).

Países como Canadá e Austrália possuem normativas, ainda que superficiais, a respeito dos parâmetros mínimos necessários para operações em pistas semi preparadas. A irregularidade quando identificada neste tipo de pista, pode ser originada pela perda de material de ações de gelo ou degelo, em países frios, ou assentamento da camada (ICAO, 2017).

É importante ressaltar que ondas de choque curto podem ocasionar na quebra do trem de pouso da aeronave. Caso a patologia se localize na trilha de roda, para pistas semi preparadas, 3 polegadas, ou seja, aproximadamente 7,6 cm são o suficiente para causarem danos em alguns modelos de aeronaves (ICAO, 2002).

Para esse tipo de pista, o documento a respeito das *Certification Authorities for Large Transport Aircraft* (CATA), representado pela ANAC, *European Union Aviation Safety Agency* (EASA), FAA e *Transports Canad*a (TCCA), recomendam que os desvios de superfície sejam avaliados através dos comprimentos e picos de ondas ou pelo *Power Spectral Density* (PSD) de forma a verificar a avaliação de fadiga nos trens de pouso causados pela irregularidade (CATA, 2021).

Desta forma, a análise dos desvios da superfície se torna importante tanto em pistas pavimentadas quanto semi preparadas.

5 CONCLUSÕES

Com base nos estudos identificados, é possível verificar a importância da avaliação adequada dos desvios da superfície de forma a garantir operações com segurança, assim como alocação dos recursos financeiros envolvidos na correção da anomalia quando identificada.

Como mencionado anteriormente, o IRI possui uma lacuna no modal aeroportuário na consideração dos comprimentos de onda críticos, assim como suas amplitudes que podem impactar de forma direta nas operações.

Com relação ao BBI, ele resulta em um parâmetro para auxiliar na estratégia de manutenção através dos desvios existentes no pavimento.

Vale ressaltar que o RRI é um índice desenvolvido recentemente pela FAA para pistas de pouso e decolagem, não sendo adequado para *taxiway*s e tampouco pátios devido à velocidade de operação. A FAA ainda complementa que este parâmetro não deve ser utilizado para aceitação da qualidade de construção.

É importante mencionar que o BBI se aproximada do RRI no quesito de desvios da superfície do pavimento, porém, o RRI possui como limitação não identificar o local da anomalia, sendo possível observar locais com aceleração experimentados pelos pilotos em aeronaves com comprimento de onda pequeno, portanto, este índice deve ser considerado um índice de aceleração e não de pavimento.

Desta forma, não é recomendado pela FAA a substituição dos índices, e sim sua utilização de forma complementar, onde o BBI contribui com os defeitos no pavimento, enquanto o RRI auxilia com os impactos de aceleração devido a condição do pavimento.

Assim sendo, fica como sugestão para as pistas pavimentadas a utilização dos três índices de forma complementar para definição da estratégia de manutenção mais adequada devido as limitações de cada índice, assim como o monitoramento através do IRI e BBI em pistas de taxi.

Com relação aos desvios indesejáveis da superfície em pistas semi preparadas, vale ressaltar que esta informação é relevante de forma a garantir a segurança das operações, uma vez que pode interferir no desempenho da aeronave.

Portanto, recomenda-se a realização de estudos de forma a definir o parâmetro mais apropriado para este tipo de levantamento.

Referências

Merighi, L. F. (2015). *Avaliação funcional de Pavimentos Asfálticos Aeroportuários com a Finalidade de Estabelecer Metas para sua Manutenção*. São Paulo: Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ASTM. (2020) *E867-06 Standard terminology relating to vehicle-pavement systems*. West Conshohocken: ASTM International.

Fernandes Junior, J. L., Oliveira, F. H. L., & Pereira, C. A. (2018). Estudos sobre pavimentos aeroportuários nas Universidades Brasileiras. *Proceedings of the XIV ALACPA Seminar*. Quito: ALACPA. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.alacpa.org/ALACPA2018_FernandesJR_Oliveira_Azevedo.pdf.

Roginski, M. (2012). Runway roughness evaluation – Boeing Bump Methodology. *Proceedings of the XI ALACPA Seminar*. Santiago: ALACPA. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-LACPA11/DIA%202%20-%204_Boeing%20Roughness.pdf.

ANAC. (2021). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil - Resolução nº 153: Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergência*. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil, 130p.

Sousa, E. S. (2021). *Análise de limites de índice de irregularidade internacional em pistas aeroportuárias com base em simulações computacionais*. Fortaleza: Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará.

FAA. (2021). *DOT/FAA/TC-21/32 - New Index Testing and Verification—Runway Roughness Index*. Washington: Federal Aviation Administration.

FAA. (2009). *AC No: 150/5380-9: Advisory Circular – Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement*

Roughness. Washington: Federal Aviation Administration.

Boeing. (1995). *D6-81746: Runway Roughness Measurement Quantification, and Application – The Boeing Method*. Arlington: Boeing Commercial Airplane Group Airport Technology Organization.

Olidis, C. (2013). Runway roughness considerations. Acessado em 02 Set 2022 em https://captg.ca/presentations/.

FAA. (2021). *Runway Roughness Index*. Washington: Federal Aviation Administration. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-05/508.FAA_RunwayRoughnessIndex_Brynick_200302.pdf.

Larkin, A., Sheng, B., Higgins, P., & Kuncas, A. (2018). *Future Federal Aviation Administration (FAA) developments of roughness evaluation for in-service airport pavement*. Washington: Federal Aviation Administration. Acessado em 02 Set 2022 em http://www.erpug.org/media/files/forelasningar_2018/16%20Status%20of%20new%20roughness%20index%20development%20for%20in-service%20airport%20pavement.pdf.

Hansen, E. (202). *Evaluating the C-17 semi prepared runway capability - an off road map*. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Institute of Technology, Air Force Air University.

ICAO. (2002). *Manutenção de pavimentos e interação da aeronave/ pavimento*. Seminário e minicurso. Bolívia: *International Civil Aviation Organization.*

ICAO. (2017). *TC. AC 300-004: Advisory Circular – Unpaved Runway Surfaces*. Quebec: International Civil Aviation Organization.

CATA. (2021). *Certification Authorities for Large Transport Aircraft. Unusual landing operations. 25.301, 25.235, 25.491, 25.571, appendix Q*. Acessado em 02 Set 2022 em https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/proposed_cwi_easa-005_unusual_landing_operations_v5_final_industry_sign_.pdf.

SINERGIA ENTRE TRANSPORTE DE CARGA E PASSAGEIRO NA EFICIÊNCIA AEROPORTUÁRIA

Viviane Adriano Falcão* Francisco Gildemir Ferreira da Silva,
Federal University of Pernambuco - UFPE, Technology and Geosciences Center – CTG
Federal University of Ceará- UFC, Programa de Pós-Graduação em Economia - CAEN

*** Corresponding author e-mail address**: viviane.afalcao@ufpe.br

PAPER ID: SIT174

RESUMO

A operação aeroportuária envolve diferentes processos com fins a embarcar/carregar e desembarcar/descarregar pessoas/cargas. Se os recursos alocados para a operação de cargas forem aproveitados na consumação do transporte de passageiros, supõe-se que a operação aeroportuária será mais eficiente. Não obstante a possibilidade de sinergia no transporte de carga/passageiros na melhoria de eficiência aeroportuária, não há registro de estudos brasileiros que mensurem as diferenças de eficiência em aeroportos em decorrência de coordenação das produções, alocação compartilhada de insumos, entre outras ações para ampliar o desempenho. Nesse sentido, este trabalho mensura a eficiência dos aeroportos brasileiros na operação conjunta carga/passageiro, compreendendo se a melhor alocação de insumos é um fator explicativo das diferenças em eficiência. Foi aplicado, em um painel com aeroportos brasileiros considerando o período de 2010 a 2020, o modelo Network DEA, além de uma correção de viés do modelo DEA convencional. Os resultados apontam uma diferença significativa na eficiência entre aeroportos considerando o DEA convencional com viés corrigido para a operação de carga e de passageiro e o modelo network DEA estimado conjunto carga/passageiro. Conclui-se, portanto, que há necessidade de considerar a interação entre a operação de carga e de passageiro na operação aeroportuária para mensurar com melhor acurácia a eficiência e, principalmente, compreender a relação entre os insumos.

Palavras-chaves: Aeroporto, Eficiência, Network DEA.

1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo caracteriza-se pela capacidade de transportar pessoas e cargas entre regiões afastadas com maior rapidez, quando comparado a outros modais como rodoviário, hidroviário e ferroviário. No caso brasileiro, pelo país ter dimensões continentais esse modo de transporte se torna ainda mais essencial.

O sistema de transporte aéreo é formado pelas aeronaves, os sistemas de navegação, as companhias aéreas e o terminal aeroportuário, são esses subsistemas que em conjunto, cada um com a sua especificidade que movimentam cargas e passageiros.

Falando especificamente do aeroporto, a complexidade da operação dele, fazendo com que haja uma mudança de modo de transportes, em geral do aéreo para o rodoviário e vice-versa, faz com que esse subsistema seja de grande importância e que a sua eficiência seja algo diretamente relacionado com a eficiência do sistema como um todo, além dele ser o local onde o passageiro tem o maior contato.

Diante disto, este trabalho tem como objetivo mensurar a eficiência dos aeroportos brasileiros na operação conjunta carga/passageiro, compreendendo se a melhor alocação de insumos é um fator explicativo das diferenças em eficiência.

2. DEA APLICADO EM AEROPORTOS

A análise envoltória de dados é uma técnica para avaliar eficiência muito difundida na área de aeroportos no mundo inteiro, através de diferentes modelos e variáveis. Alguns utilizam o DEA como método para a validação de hipóteses ou proposição de novas teorias aplicadas aos aeroportos. Como Fernandes e Pacheco (2002), eles analisaram a eficiência de 35 aeroportos brasileiros com operação doméstica, em termos de números de passageiros transportados. Os dados processados foram referentes a 1998.

Tsui et al. (2014) estudaram a eficiência operacional de 21 aeroportos da Ásia e Pacífico, entre 2002 e 2011. Como resultado, 52% dos aeroportos foram considerados eficientes em algum momento entre 2002 e 2011, sendo que 6 foram classificados como eficientes durante todo o período analisado. Sugeriram que a porcentagem de passageiros internacionais, população próxima ao aeroporto, companhias aéreas dominantes e o PIB per capita influenciam na variação da eficiência aeroportuária.

Wanke e Barros (2017) analisam cinco diferentes aeroportos do Senegal, ou em Merkert e Assaf (2015) que investigam se a percepção de satisfação do passageiro apresenta um impacto nas margens de lucro.

Toledo et al. (2021) desenvolveram uma pesquisa sobre a eficiência de 27 aeroportos brasileiros utilizando a técnica DEA, vertente SBM (Slack Based Measure). Esse modelo baseia-se em folgas e permite a orientação simultânea a input e a output, determinando, assim, a menor distância a ser percorrida pela DMU até a fronteira de eficiência. Os resultados mostraram que 11 aeroportos foram considerados eficientes, sendo que dos 16 aeroportos restantes, apenas 2 apresentaram eficiência superior a 50%.

Não foi encontrado, nenhum estudo considerando a eficiência em aeroportos brasileiros que aplicou o Network DEA ou até mesmo corrigiu o viés do DEA convencional. Nesse contexto, esse artigo preenche uma lacuna importante na literatura.

3. METODOLOGIA

O processo de modelagem com o DEA calcula por comparação, as eficiências de cada DMU, no caso dessa pesquisa, de cada aeroporto. A sequência foi a definição das variáveis de inputs e outputs com base na revisão da literatura, levantamento dos dados com considerações sobre as DMUs.

Para tanto, foram considerados os seguintes inputs e outputs dos anos de 2010 até 2020:

- Inputs – PAX: Área do terminal de passageiros (ANAC / INFRAERO / administração dos aeroportos); Comprimento total de pistas (SAC)/ASK (ANAC)
- Outputs – PAX: Movimentação de passageiros (ANAC); Número de aeronaves (SAC)
- Inputs – Carga: Comprimento total de pistas (SAC)/ATK(ANAC).

- Outputs – Carga: Movimentação de carga aérea (SAC) – kg; Movimentação de mala postal (SAC) – kg.

Foram analisados 17 aeroportos do Brasil (Guarulhos/SP-SBGR; Congonhas/SP-SBSP; Brasília/DF-SBBR; Galeão/RJ-SBGL; Confins/MG-SBCF; Campinas/SP-SBKP; Recife/PE-SBRF; Porto Alegre/RS-SBPA; Salvador/BA-SBSV; Fortaleza/CE-SBFZ; Curitiba/PR-SBCT; Florianópolis/SC-SBFL; Belém/PA-SBBE; Manaus/AM-SBEG; Maceió/AL-SBMO; São Luís/MA-SBSL e Campo Grande/MS- SBCG), com os dados acima, entre os anos 2010 e 2020.

Este trabalho, metodologicamente, fará uma comparação entre modelos alternativos ao CCR tradicional, primeiramente executando modelo de correção de viés (Kneip et. al, 2011), seguido pelo modelo Network DEA (Kao e Hwang, 2008). Os resultados serão comparados do ponto de vista eficiência global para identificar se há ou não ganhos de eficiência.

No primeiro passo, estima-se um modelo DEA CCR com correção de viés seguindo a proposta de Kneip et. al (2011), executando bootstrap ingênuo, baseado em reamostragem da distribuição empírica dos dados. Nesse procedimento parte da construção de uma amostra parcial do bootstrap situadas "longe" da fronteira estimada, enquanto se extrai de uma distribuição suave e uniforme para construir a parte da amostra bootstrap situada "próxima" da estimativa estimada fronteira. A distinção entre "perto" e "longe" é controlada por um parâmetro de suavização, enquanto um segundo parâmetro de suavização controla o grau de suavização aplicado a fronteira estimada, garantindo uma baixa necessidade computacional.

Sequencialmente, executa-se o Network DEA (NDEA) utilizado no trabalho, que é uma extensão do conceito do modelo CCR DEA, desenvolvido por Charnes et al. (1978), pois calcula as eficiências relativas das unidades tomadoras de decisão (DMUs), assumindo a existência de processos internos e relacionados, cada um com um conjunto de inputs e outputs. Os inputs e outputs são utilizados e a eficiência é calculada através da resolução de um Problema de Programação Linear (PPL). Metodologicamente, assumiu-se o modelo multi-estágio, utilizando-se o modelo multiplicativo apresentado em Kao e Hwang (2008). Onde: E_0 = eficiência global; E_0^1 e E_0^2 = eficiências dos estágios 1 e 2; u,v,w são os pesos das variáveis e x,y,z, os valores dos inputs, dos outputs e das variáveis intermediárias.

$$E_0^1 = \text{m}\ \frac{\sum_{d=1}^{D} w_d z_{d0}}{\sum_{i=1}^{n} v_l x_{i0}}$$
$$\text{s.t.}\ \frac{\sum_{d=1}^{D} w_d z_{dj}}{\sum_{t=1}^{m} v_i x_{ij}} \leq 1, j = 1,2,\dots,n \quad (1)$$
$$w_d, v_t \geq 0, i = 1,2,\dots,m, d = 1,2,\dots,D$$

$$E_0^2 = \text{m}\ \frac{\sum_{f=1}^{d} u_r y_{r0}}{\sum_{d=1}^{p} w_d z_{d0}} \quad (2)$$
$$\text{s.}\ t \cdot \frac{\sum_{f=1}^{g} u_r y_{+j}}{\sum_{d=1}^{b} w_d z_{dj}} \leq 1, j = 1,2,\dots,n$$
$$u_r, w_d \geq 0, d = 1,2,\dots,D, r = 1,2,\dots,s$$

A análise dos resultados segue do valor de E_0 se ele for igual a 1 indica eficiência, se $E_0 <$ 1 aponta ineficiência. As eficiências de E_{01} e E_{02}, são calculadas de acordo com os Problemas de Programação Linear apresentados nas equações 1 e 2, utilizados no cálculo da eficiência global conforme Equação (3).

$$E_0 = E_0^1 x E_0^2 \quad (3)$$

Após o cálculo das estimações da eficiência executa-se a comparação para analisar se a eficiência do CCR tradicional é diferente do NDEA e do CCR com correção de viés. A comparação serve para verificar se há um viés e se esse viés pode ser corrigido assumindo uma estrutura sequencial como apontada por Kao e Hwang (2008). Se encontrado viés e a estimativa do NDEA explicar parte desse viés, comprova-se a sinergia entre a sequência desejada de eficiências, caso contrário, não se pode afirmar nada sobre a sinergia.

4. RESULTADOS

Em um primeiro momento foram comparados os resultados do DEA Simples com o DEA corrigido. Como exemplo segue, a Tabela 1 com os resultados para os aeroportos brasileiros no ano de 2020.

Tabela 1_ DEA Simples x DEA Corrigido em 2020

	DEA Simples (DEAs)		DEA corrigido (DEAc)		DEAc - DEAs	
	Carga	**Pax**	**Carga**	**Pax**	**Carga**	**Pax**
SBBE	17%	4%	16%	4%	-1%	-1%
SBBR	20%	9%	18%	13%	-2%	4%
SBCF	25%	9%	23%	7%	-2%	-1%
SBCG	25%	4%	23%	3%	-2%	-1%
SBCT	10%	5%	10%	4%	-1%	-1%
SBEG	12%	48%	11%	43%	-1%	-5%
SBFL	10%	5%	10%	14%	-1%	9%
SBFZ	17%	15%	14%	13%	-2%	-2%
SBGL	9%	8%	8%	7%	-1%	-1%
SBGR	41%	68%	37%	59%	-4%	-9%
SBKP	37%	100%	35%	88%	-2%	-12%
SBMO	14%	1%	14%	1%	-1%	0%
SBPA	22%	15%	20%	13%	-2%	-2%
SBRF	26%	17%	24%	15%	-3%	-2%
SBSL	19%	1%	18%	1%	-1%	0%
SBSP	32%	5%	28%	5%	-4%	-1%
SBSV	13%	11%	11%	27%	-2%	16%

As colunas 2 e 3 são as eficiências de carga e passageiro, respectivamente, sem retirar o viés, ou seja, o DEA Simples. Na coluna 4 tem-se a eficiência tirando o viés de carga. Na coluna 5 mostra qual deveria ser a eficiência, retirando o viés, do transporte de passageiros. Em geral, o DEA corrigido apresenta valores inferiores ao DEA simples, indicando que há um viés. Ou seja, diminuem, o que significa haver algo que não pode ser explicado em relação a carga e os passageiros, portanto, utilizar o Network DEA, na proposta dada, não agrega informações.

Importante ressaltar que para os outros anos o resultado não mudou muito, entretanto, percebe-se que para os passageiros, os aeroportos de Brasília, Florianópolis, Maceió, São Luís e Salvador apresentaram valores de DEA corrigido maiores que o DEA simples. Além disso, outro resultado interessante é que o viés era maior nos primeiros anos e vai diminuindo ao longo do tempo.

Os resultados do NetworkDEA, para o ano de 2020, estão apresentados na Tabela 2, onde na coluna 2 tem-se a eficiência de cargas quando associada a eficiência de passageiros, ou seja, quando a eficiência de carga for 100% a eficiência de passageiros será aquela calculada na coluna 3. E o sentido inverso nas colunas 4 e 5, e como pode-se perceber os valores são os mesmos nos dois sentidos. Além disso, pode-se calcular a eficiência global multiplicando os valores da coluna 3 e 5, o fato de serem iguais indicam que não há melhora na eficiência de passageiro com um transporte de carga eficiente.

Tabela 2_ Network DEA em 2020

	Network DEA			
	Carga/Pax	**Pax**	**Pax/Carga**	**Carga**
SBBE	100%	4%	100%	4%
SBBR	100%	9%	100%	9%
SBCF	100%	9%	100%	9%
SBCG	100%	4%	100%	4%

SBCT	100%	5%	100%	5%
SBEG	100%	48%	100%	48%
SBFL	100%	5%	100%	5%
SBFZ	100%	15%	100%	15%
SBGL	100%	8%	100%	8%
SBGR	100%	68%	100%	68%
SBKP	100%	100%	100%	100%
SBMO	100%	1%	100%	1%
SBPA	100%	15%	100%	15%
SBRF	100%	17%	100%	17%
SBSL	100%	1%	100%	1%
SBSP	100%	5%	100%	5%
SBSV	100%	11%	100%	11%

Por fim, o resultado das colunas 3 e 5 da Tabela 2 não diferem muito da eficiência calculada no DEA simples (colunas 2 e 3 Tabela 1), logo, a carga não melhora ou piora a eficiência de passageiros.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se, portanto, que o NetworkDEA não indica relação de melhora de eficiência de passageiro com um transporte de carga eficiente. Já o DEA corrigido, indica um viés no DEA simples que era maior nos primeiros anos e foi diminuindo temporalmente.

Neste sentido, sugere-se avançar na pesquisa de procurar fatores que possam reduzir o viés que foi encontrado em uma modelagem Network DEA. Para tanto, deve-se investigar novas variáveis que expliquem melhor a eficiência e a sinergia entre cargas e passageiros.

References

ANAC – Agência Nacional da Aviação Civil. Dados e Estatísticas. Brasil, 2006, ANAC. Disponível em: < https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas >. Acesso em: 11 de fev. de 2022.

ANAC – Agência Nacional da Aviação Civil. Dados abertos. Brasil, 2022, ANAC. Disponível em: < https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/ ppli-de-atuacao/todos-os-dados-abertos >. Acesso em: 14 de jan. 2022.

FERNANDES, E.; PACHECO, R. R. Efficient use of airport capacity. Rio de Janeiro, Brazil. 2001. Transportation Research Part A 36 (2002) 225-238.

HÓRUS – Sac Minfra. Gerencial, Módulo de Informações Gerenciais. Governo Federal, Ministério da Infraestrutura, Secretaria Nacional de Aviação Civil, Brasil, 2022. Disponível em: < https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/?auth=s#Principal>. Acessado em 13 de fev.. de 2022.

INFRAERO. Dados sobre aeroportos públicos brasileiros. Disponível em: < https://www4.infraero.gov.br/ >. Acessado em 13 de fev. de 2022.

KAO, C.; HWANG, S.-N. Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. European Journal of Operational Research, v. 185, n. 1, p. 418–429, 16 fev. 2008.

KNEIP, A. AND SIMAR, L. AND WILSON, P.W. 2011. A computationally efficient, consistent bootstrap for inference with non-parametric DEA estimators. Computational Economics. Vol.38, pp.483–515.Alharbi, B., & Prince, M. (2020). A Hybrid Artificial Intelligence Approach to Predict Flight Delay. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 814-822.

Merkert, R. e A. G. Assaf (2015) Using DEA models to jointly estimate service quality perception and profitability – Evidence from international airports. Transportation Research Part A:

Policy and Practice, v.75, p.42–50. DOI: 10.1016/j.tra.2015.03.008.

Toledo, Fernanda Silva; Falcão, Viviane Adriano; Camioto, Flávia de Castro; da Silva, Paulo Afonso Lopes. “Does privatization make Brazilian airports more efficient?” TRANSPORTES, agosto de 2021. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2304.

Tsui, Wai Hong Kan; Balli, Hatice Ozer; Gilbey, Andrew; Gow, Hamish. “Operational Efficiency of Asia–Pacific Airports”. Journal of Air Transport Management, vol. 40, agosto de 2014, p. 16–24. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.05.003.

Wanke, P. e C. P. Barros. (2017) Efficiency thresholds and cost structure in Senegal airports. Journal of Air Transport Man-agement, v. 58, p. 100-112. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2016.10.005.

ESTUDO DA IMPLANTAÇÃO DE ENGINEERED MATERIAL ARRESTING SYSTEM (EMAS) NO AEROPORTO JORGE AMADO - ILHÉUS POR MEIO DE ANÁLISE DE RISCO

Patrícia Tieko Lopes Okuma, Felipe Hernandes Cava, Carlos Yukio Suzuki
Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Civil e Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: patricia.okuma@hotmail.com

PAPER ID: SIT208

ABSTRACT

The lack of adequate conditions on runways, such as a Runway Safety Area (RSA) smaller than that specified by the RBAC, can result in aeronautical accidents. However, currently, there are systems whose function is to increase the airport's security level, without the need to expand the RSA or reduce the runway. The Engineered Material Arresting System (EMAS) consists of a passive aircraft arrest system, in which the aircraft, in the event of a runway excursion, by overrun or veer-off, it is completely stopped, in order to mitigate damage to passengers, crew and the aircraft itself. EMAS is mainly used in airports with limited expansion areas and which present risks of aeronautical accidents, such as Ilhéus Airport. The general objective of this work is to study the efficiency of EMAS and risk analysis as an analysis method for implementing the system at Jorge Amado – Ilhéus Airport (SBIL). Through the results of the existing condition of RSA, of the Ilhéus Airport, an overrun risk during the landing of $1.2x10^{-6}$ it was observed. Considering the deployment of EMAS for 50, 60 and 70 knots, a reduction in the risk of overrun during landing was observed by 32%, 35% and 38%, respectively. In addition, the implementation of EMAS reduces the overall risk of the airport by 32% compared to the existing RSA in Ilhéus, whose probability of serious incidents is currently $7.2x10^{-7}$. Through the analyzes developed in this work, it is considered that the EMAS designed for an entry speed of 50 knots presents better cost-benefit due to the increase in security provided to the airport and less investment in infrastructure.

Keywords: EMAS, Runway excursion, Overrun.

ACKNOWLEGDEMENTS

Agradacemos ao Centro Universitário FEI e à Escola Politécnica da USP por todo o suporte prestado para a realização do presente artigo.

1. INTRODUÇÃO

Os acidentes aeronáuticos são causados por uma somatória de variáveis, direitas ou indiretas, podendo ser ocasionados ainda por falha humana ou por falha mecânica (CENIPA, 2021).

A falta de condições adequadas na pista de pouso e decolagem é uma das possíveis causas de acidentes aeronáuticos. Por exemplo, *Runway End Safety Area* (RESA) menor do que o mínimo especificado no Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC).

Ainda de acordo com o CENIPA (2021), e baseando-se nos acidentes aeronáuticos registrados nos últimos 10 anos, foram obtidos os totais de acidentes, acidentes fatais e fatalidades ilustrados na Figura 1.



Figura 1 Panorama dos acidentes nos últimos 10 anos. Fonte: CENIPA, 2021.

Uma aeronave pode sofrer diversos tipos de acidentes durante operações de pouso e decolagem. Dentre os possíveis acidentes estão os ocasionados por excursão de pista, como *overrun*, no qual a aeronave ultrapassa o final da pista e, *veer-off*, no qual a aeronave ultrapassa a lateral da pista (ANAC, 2021).

Em 17 de julho de 2007, no Aeroporto de Congonhas, ocorreu a maior tragédia da aviação brasileira, ilustrada na Figura 2, totalizando 199 vítimas fatais.



Figura 2 Acidente com o voo JJ3054 da TAM. Fonte: Guerreiro, 2007.

Nesse acidente, segundo Duarte e Macedo (2012), o *Airbus* A320-233, da TAM, que havia saído do Aeroporto Internacional de Porto Alegre e tinha como destino o Aeroporto de Congonhas, ao iniciar a operação de pouso, acabou perdendo o controle, ultrapassando a pista pela sua lateral, atingindo um edifício localizado no outro lado da Avenida Washington Luís, em São Paulo.

O Aeroporto de Congonhas é o primeiro da América Latina a aderir ao *Engineered Material Arresting System* (EMAS), sendo o acidente mencionado um dos motivadores para tal implantação.

O EMAS é um sistema passivo de apreensão de aeronaves, conforme ilustrado na Figura 3, no qual a aeronave é imobilizada por meio da força de arrasto gerada através do atrito entre os trens de pouso e o leito supressor.

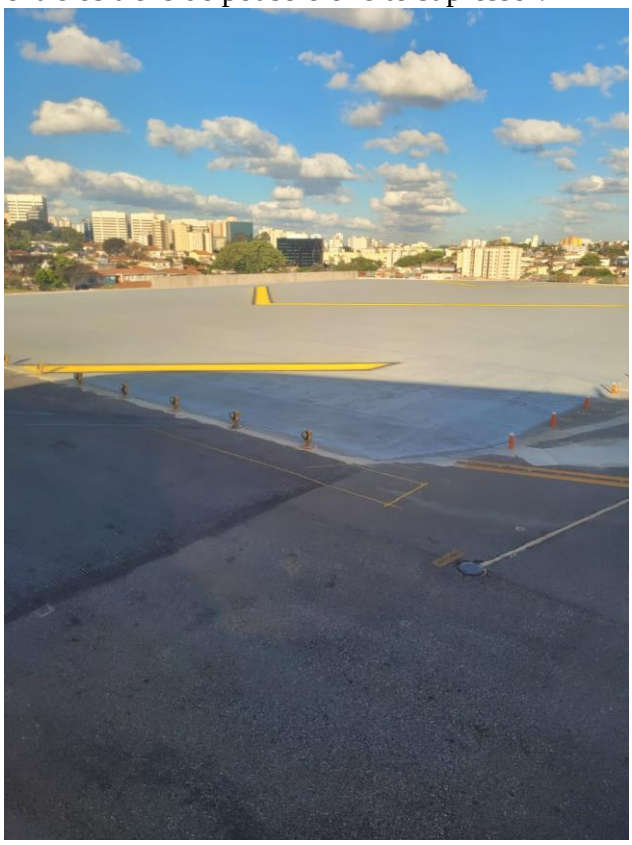


Figura 3 EMAS implantado no Aeroporto de Congonhas. Fonte: Autores, 2022.

Esse sistema é projetado para que aeronaves em excursão de pista sejam imobilizadas, de forma gradual, com a finalidade de mitigar os danos gerados aos passageiros, tripulantes e à própria aeronave (Yang et al., 2018).

Portanto, a implantação do EMAS auxilia na redução de risco de um aeroporto, consequentemente, aumentando sua segurança. Sendo um sistema utilizado, principalmente, em aeroportos que apresentem riscos de acidentes

aeronáuticos, devido à reduzida extensão de pistas de pouso e decolagem e limitação na expansão de sua respectiva área.

Uma das formas de saber a viabilidade técnica da implantação do sistema em um aeroporto é por meio da análise de risco, cujo nível aceitável de segurança, estabelecido pela Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido (CAA), é de $1x10^{-7}$.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é estudar a eficiência do EMAS e o método para análise de risco da viabilidade de implantação do EMAS no Aeroporto Jorge Amado – Ilhéus.

2. MÉTODOS

O Aeroporto selecionado para os estudos do presente trabalho foi o Jorge Amado – Ilhéus, situado no estado da Bahia; o qual possui uma pista com 1.467 m de comprimento por 45 m de largura, cujas cabeceiras, 11 e 29, estão, respectivamente, limitadas pelo Rio Cachoeira e pela Rodovia Barão do Rio Branco, seguida pelo mar.

Conforme mencionado anteriormente, a verificação da viabilidade técnica da implantação do EMAS foi realizada por meio da análise de risco, com o auxílio do software RSARA2, como ilustrado na Figura 4, o qual utiliza a metodologia descrita no ACRP *Report* 50.



Figura 4 Tela inicial do RSARA2. Fonte: Autores, 2022.

Os modelos utilizados para a concretização da análise de risco pelo ACRP *Report* 50 são: modelo de probabilidade, modelo de localização e modelo de consequência.

O modelo de probabilidade estima a probabilidade de ocorrência de cada tipo de evento, LDUS (*undershoot* durante pouso), LDOR (*overrun* durante pouso), LDVO (*veer-off* durante pouso), TOOR (*overrun* durante decolagem) e TOVO (*veer-off* durante decolagem), por meio de uma análise de regressão logística, conforme Equação (1).

$$P = \frac{1}{1 + e^{b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \cdots}} \qquad (1)$$

Onde: P é o percentual da probabilidade de ocorrência de um acidente; b_n são os coeficientes de regressão e; x_n são as variáveis independentes.

O modelo de localização estima a probabilidade de uma aeronave parar a uma certa distância após final da pista de pouso e decolagem, ainda sobre a RESA.

Enquanto o modelo de consequência estima a gravidade da ocorrência, levando em consideração o modelo de localização somado aos obstáculos presentes no entorno.

Segundo Eddowes et al. (2001), para fins de comparação, os níveis aceitáveis de segurança, estabelecidos pela autoridade de aviação civil do Reino Unido (CAA), é de $1{,}0 \cdot 10^{-7}$ por operação, para ultrapassagens do tipo *overrun* com consequências graves e, $5{,}0 \cdot 10^{-7}$ por operação, para ultrapassagens do tipo *overrun*.

Os elementos de entrada necessários para a realização da análise de risco são: séries históricas de operações, dados históricos meteorológicos (METAR – *Meteorological Aerodrome Report*), características da pista, característica da RESA e algumas informações gerais, como o volume anual de tráfego e correspondente taxa de crescimento.

Os dados históricos de operações são relativos ao tipo de aeronave utilizada em cada operação, tanto de pouso quanto de decolagem, do aeroporto em questão, bem como a data e horário de ocorrência.

As características da pista são relativas à elevação, à direção, às distâncias declaradas, dentre outras informações que se referem, exclusivamente, à pista.

Já as características da RESA são relativas à geometria, à localização, ao tipo de material que compõe essa área, principalmente sua superfície, aos obstáculos presentes, dentre outros.

Para a realização da análise de risco, os dados de entrada referentes ao Aeroporto Jorge Amado – Ilhéus foram considerados como: elevação de 4,57 m acima do nível do mar, taxa de crescimento de tráfego anual de 0,0% e movimentação anual de 8.400 operações; já as

características geométricas das áreas após a pista de pouso e decolagem foram estimadas conforme cada cenário, que serão apresentados adiante.

A análise de risco foi realizada para seis diferentes cenários, os quais terão seus resultados comparados a fim de se escolher o mais viável, tecnicamente, para o Aeroporto Jorge Amado - Ilhéus.

Com base no mix de aeronaves do Aeroporto Jorge Amado – Ilhéus, o modelo A319 é o que apresenta o maior Peso Máximo de Decolagem dentre as três aeronaves mais frequentes, como ilustrado na Figura 5, cujas operações correspondem a 22,01% do total anual realizado, entretanto, no *Advisory Circular* 150/5220-22B não há um ábaco para esse modelo, sendo plausível substituí-lo, para fins de cálculos, pelo modelo B737.

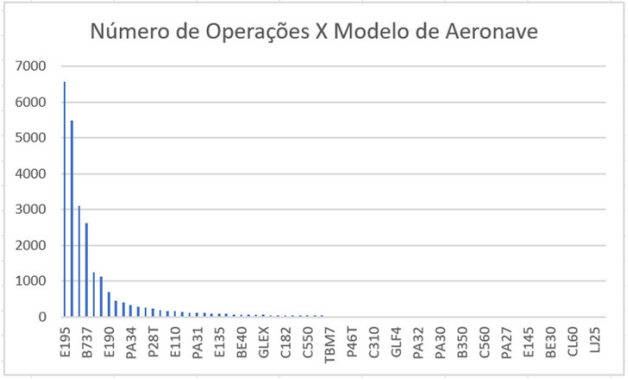


Figura 5 Frequência dos modelos de aeronaves que operam no Aeroporto Jorge Amado – Ilhéus. Fonte: Autores, 2022.

O pré-dimensionamento para os cenários que apresentam o EMAS foi feito a partir dos ábacos encontrados no *Advisory Circular* nº 150/5220-22B.

A diferença entre os seis cenários estudados está na área após o final da pista de pouso e decolagem.

O cenário 1 apresenta a RESA atual; os cenários 2 e 3 simulam, respectivamente, que o aeroporto, código 3, foi cadastrado na Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) antes e depois da alteração do RBAC, em 12 de maio de 2009 e; os cenários 4, 5 e 6 simulam o aeroporto com EMAS, cujas velocidades de saída de pista são de 50, 60 e 70 nós, respectivamente.

A velocidade de saída de pista para qual o EMAS é projetado, é a velocidade máxima com que a aeronave pode atingir o leito supressor sem comprometer sua eficiência.

Na Tabela 1 são exibidos os seis diferentes cenários, com seus respectivos comprimentos de RESA ou EMAS, para cada uma das cabeceiras.

Tabela 1 Comprimento mínimo requerido para cada cenário

Cenário	*Comprimento mínimo requerido (m)*	
	Cabeceira 11	*Cabeceira 29*
1	48,77	152,40
2	90	90
3	240	240
4	83	83
5	100	100
6	150	150

Ressaltando que, para os cenários 2 e 3 é necessária ainda uma área de *Stopway*, com 60 m de extensão para ambos os casos, além dos comprimentos apresentados na Tabela 1, localizada entre o final da pista de pouso e decolagem e o início da RESA; já para os cenários 4, 5 e 6 é necessário um espaçamento, denominado *Setback*, situado entre o final da pista de pouso e decolagem e o início do leito supressor, cujo comprimento adotado foi de 9 m, além dos comprimentos apresentados na tabela acima, a fim de evitar danos ao EMAS causados pelo *Jetblast*, que é uma explosão de ar provocada pela aeronave durante operação de decolagem.

3. RESULTADOS

A seguir, na Tabela 2, serão exibidos os resultados gerais das análises de risco realizadas para os três cenários sem a presença do EMAS.

Tabela 2 Resultados gerais para os cenários 1, 2 e 3 (sem EMAS)

Tipo de Acidente	*Probabilidade média*		
	Cenário 1	*Cenário 2*	*Cenário 3*
LDOR	1,0E-06	1,1E-06	3,9E-07
TOOR	2,5E-07	2,5E-07	1,4E-07
LDUS	9,3E-08	6,6E-08	4,9E-08
LDVO	6,5E-08	9,7E-08	9,7E-08
TODO	2,2E-09	2,6E-09	2,6E-09
Total	7,2E-07	7,6E-07	3,4E-07

De acordo com a tabela anterior, a probabilidade média total para o cenário 1 é de

$7{,}2 \cdot 10^{-7}$, ou seja, 1 acidente a cada 1.388.888 operações, o equivalente a 165 anos; já para o cenário 2, a probabilidade média total é $7{,}6 \cdot 10^{-7}$, ou seja, 1 acidente a cada 1.315.789 operações, equivalente a 156 anos e; para o cenário 3, a probabilidade média total é de $3{,}4 \cdot 10^{-7}$, ou seja, 1 acidente a cada 2.941.176 operações, equivalente a 350 anos.

A partir do cenário 4, tem-se a implantação do EMAS, como sistema de apreensão, cuja finalidade é aumentar os níveis de segurança do aeroporto.

A Tabela 3 apresenta os resultados gerais das análises de risco realizadas para todos os três cenários com a presença do EMAS.

Tabela 3 Resultados gerais para os cenários 4, 5 e 6 (com EMAS)

Acidente	*Probabilidade média*		
	Cenário 4	*Cenário 5*	*Cenário 6*
LDOR	6,1E-07	5,7E-07	5,3E-07
TOOR	1,9E-07	1,9E-07	1,8E-07
LDUS	8,3E-08	7,7E-08	7,2E-08
LDVO	9,7E-08	9,7E-08	9,7E-08
TODO	2,6E-09	2,6E-09	2,6E-09
Total	4,9E-07	4,7E-07	4,5E-07

Com base na tabela acima, nota-se que a probabilidade média total para o cenário 4 é de $4{,}9 \cdot 10^{-7}$, ou seja, 1 acidente a cada 2.040.816 operações, equivalente a 242 anos; já para o cenário 5, a probabilidade média total é de $4{,}7 \cdot 10^{-7}$, ou seja, 1 acidente a cada 2.127.659 operações, equivalente a 253 anos e; para o cenário 6, a probabilidade média total é de $4{,}5 \cdot 10^{-7}$, ou seja, 1 acidente a cada 2.222.222 operações, equivalente a 264 anos.

Portanto, a partir dos resultados mostrados, é possível notar que para todos os cenários, a média de tempo entre ocorrências, no Aeroporto Jorge Amado – Ilhéus, resultou acima de 100 anos. Esses resultados se devem ao fato de o aeroporto apresentar um baixo fluxo de movimentação, como já mencionado, apenas 8.400 operações por ano.

Comparando as probabilidades médias totais apresentadas anteriormente, para cada um dos seis cenários, pode-se notar que, em relação ao cenário 1 (RESA atual), o cenário 2 apresentou um acréscimo de 5,80%, enquanto os cenários 3, 4, 5 e 6 apresentaram uma queda de, respectivamente, 53,10%, 31,83%, 35,53% e 38,42%, conforme se verifica na Figura 6.

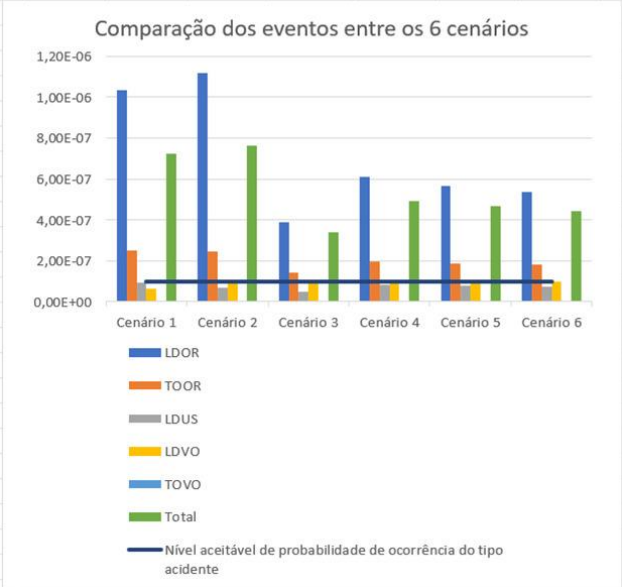


Figura 6 Comparativo dos resultados gerais entre todos os cenários. Fonte: Autores, 2022.

Ao comparar os três cenários com a presença do EMAS, tem-se, percentualmente, que o cenário 5, apresenta uma queda de 5,43% da probabilidade média total em relação ao cenário 4, enquanto o comprimento necessário do leito supressor é 20,48% maior. Já o cenário 6, apresenta uma queda de 9,68% da probabilidade média total em relação ao cenário 4, enquanto o comprimento necessário do leito supressor é 80,72% maior.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que, o Engineered Material Arresting System, realmente, é eficaz na diminuição da probabilidade e da gravidade de acidente de um aeroporto. Entretanto, para aeroportos cuja área disponível para expansão da RESA não é limitada, o EMAS pode não ser a melhor opção, como pode-se notar no cenário 3, o qual apresentou a maior diminuição do risco médio total, com 53,10%.

Ainda com base nos resultados obtidos, é notável que para os cenários com a implantação do leito supressor como forma de aumentar o nível de segurança do Aeroporto, o que apresentou maior diminuição do risco médio total foi cenário 6, cuja velocidade máxima de saída de pista é de 70 nós, porém, quando comparado ao cenário 4 e ao cenário 5, essa

diminuição não é tão relevante, considerando a diferença do comprimento necessário para as três intervenções.

Portanto, conclui-se que, devido à baixa movimentação anual no Aeroporto Jorge Amado - Ilhéus, e pelo respectivo risco apresentado, para quaisquer cenários, não se justifica a implantação do EMAS, já que o tempo médio entre incidentes graves é acima de 100 anos.

Referências

ACRP Report 50 (2011). Improved Models for Risk Assessment of Runway Safety Areas. *The National Academies Press, Washington, D.C., 2011*.

Advisory Circular (2012). *Engineered Materials Arresting Systems (EMAS) for Aircraft Overruns.* Advisory Circular, 27 set. 2012. Acesso em 07, nov. 2021 em https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_150_5220-22B.pdf

Aeroporto de Ilhéus (2021). *Sobre o Aeroporto. Aeroporto de Ilhéus, 2021*. Acesso em 15, nov. 2021 em http://ilheus-aero.com.br/o-aeroporto/sobre-o-aeroporto

Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil – RBAC nº 154.* ANAC, 17, set. 2021. Acesso em 09, nov. 2021 em https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/boletim-de-pessoal/2019/37s1/anexo-i-rbac-no-154-emenda-06

ANACpédia (2021). *Excursão de pista.* ANACpédia. Acesso em 07, nov. 2021 em https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_ing/tr2254.htm

Assessoria Estatística (2021). *Aeródromos – Sumário Estatístico 2010-2019.* Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Brasília, 2021.

CENIPA (2009). *Relatório final A – nº 67/CENIPA/2009.* CENIPA, 2009. Acesso em 07, nov. 2021 em http://sistema.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/pr_mbk_17_07_2007.pdf

Duarte, N.; Macedo, L. (2012). *Acidente da TAM completa 5 anos sem julgamento de denunciados.* G1, São Paulo, 17, jul., 2012. Acesso em 07, nov. 2021 em http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2012/07/acidente-da-tam-completa-5-anos-sem-julgamento-de-denunciados.html

Eddowes, M.; Hancox, J.; Macinnes, A. (2011). Final Report on the Risk Analysis in Support of Aerodrome Design Rules. *Report AEAT/RAIR/RD02325/R/002, desenvolvido para a Norwegian Civil Aviation Authority.* AEA, Technology, 2001.

Federal Aviation Administration (2021). *Engineered Material Arresting System (EMAS).* Federal Aviation Administration, 29, jul. 2021. Acesso em 07, nov. 2021 em https://www.faa.gov/newsroom/engineered-material-arresting-system-emas-0

Guerreiro, B. (2007). *Acidente com avião da TAM @ São Paulo.* Flickr, 18, jul. 2007. Acesso em 15, nov. 2021 em https://www.flickr.com/photos/auto_photo/843472475/in/photostream/

Yang, X.; Yang, J.; Zhang, Z.; Ma, J.; Sun, Y.; Liu, H. (2018). A review of a civil aircraft arresting system for runway overruns. *Progress in Aerospace Sciences, n. 102, P. 99-121, outubro, 2018.*

AIRCRAFT ACCIDENTS AND GROUND CASUALTIES NEAR AIRPORTS: EVIDENCE FROM GLOBAL SOUTH AND GLOBAL NORTH COUNTRIES

Luiz Henrique Werneck de Oliveira
Ph.D., Territory Planning and Management, M.Sc. Civil-Hydraulic Engineering, B.Sc. Sanitary Engineering, B.Sc. Social Sciences
PGT-UFABC; Zukunft Consulting

*** Corresponding author e-mail address**: luizwerneck64@gmail.com

PAPER ID: SIT213

ABSTRACT

Safety is an intrinsic characteristic of civil aviation, but while accidents are rare, they do happen. From 2011 to 2020, 67% of aircraft accidents occurred at takeoffs, landings, approach or initial climb flight phases, thus generally close to airports. This article investigates to what extent aircraft accidents affecting ground structures happened close to airports throughout a century of accident records and how they distribute geographically. An extensive database of aircraft accidents' descriptions was evaluated. From 1926 to 2020, 833 accidents were identified as affecting some structure on the ground, of which 327 happened in a known, identifiable location ranging from 0.10km to 45km outside the airport site, many of them causing ground casualties. Of these, 77% of the events and fatalities happened within 5 km from the airports' limits. The distribution of these 327 events and 1,798 ground casualties was analyzed considering distance from the airports and the Human Development Index (HDI) to classify countries as global North and global South. Results upon such classification show that the number of events is fairly balanced (52.91% at global North and 47.09% at global South) but the number of ground casualties is otherwise very unbalanced: 75.14% at global South *versus* 24.86% at global North countries. Moreover, the vast majority of ground casualties at global South countries happened within the ranges of 0.1km-1.0km and 1.1km to 2.0km from the airports sites. This indicates that, safety-wise, urban planning has been more effective around global North countries' airports, while the urban dynamics of no or poor land use control around airports of global South countries resulted on dense residential areas occupying their proximities, which is a contributing cause for such unbalance. This brings further burden for airport and urban planners of global South Countries to effectively manage the airport-community conflict.

Keywords: Aviation Safety, Ground Casualties, Airport Vicinities, Global North, Global South.

ACKNOWLEGDEMENTS

The author would like to thank Mr. Harro Ranter for the excellent job in creating and keeping the public site Aviation Safety Network as a reference database of aviation safety information.

1. INTRODUCTION

Although safety is an intrinsic and important aspect of aviation, accidents do happen. Throughout history, the number of aircraft accidents divided by the number of take offs has been much higher, thereby aviation as a whole became a lot safer over the past decades.

However small the number of accidents divided by take offs, aircraft accidents are psycho-sociological events high publicized by the media and press, and fear of flying leads feelings of anxiety that takes place at airports, prior to the boarding of passengers, as taking off is optional, but landing is mandatory.

Also, statistical records show that, decades after decades, the majority of aircraft accidents happen on the flight phases of landing, final approach, take off and initial climb rather than *en-route* or at cruise speeds and altitudes (when accidents happen, but are less often, and many times caused by factors out of control of commanding crew, such as sabotage and terrorist bombings).

The flight phases with more accidents are closer to airports, placing an additional impact of these key infrastructure elements. Although aircraft noise may be considered the major impact of airports, safety around airports haunt many neighbors given the high coverage from media despite relatively low statistical significance. Other impacts of airports include ground access congestion, urban segmentation (given they require lots of land), air pollution (emissions from ground vehicles, on the access and aggresses of people and cargo etc.), deviation of water bodies, filling of wetlands and beaches, creating artificial islands (rare few cases), loss of natural habitats, and even light emissions at night confusing birds. The perception of safety risk in its neighborhoods is probably second only to aircraft noise.

This study investigated an extensive data base of aircraft accidents with over a hundred years of records, spanning from 1919 to 2020. By reviewing entries' descriptions (over 20,000, most of them relatively short), it was possible to segregate records of aircraft accidents where some ground structure was affected and, within them, the cases in which there were ground casualties – fatal victims who were not aboard the aircraft involved on the accident.

The next step was to evaluate, either at indicated location or within the descriptions, the distance from airports that such accidents happened, to compute if the number of events and the number of ground casualties correlate with distance from the airport. It was found that the number of events and the number of ground casualties is significantly higher when close to airports than in the cases known to have happened far away from airports.

Finally, the geographical location variable was studied by separating the records from countries of the so-called global North (richer and more developed) from those of the global South (poorer, less developed and more populated) by computing the Human Development Index (HDI) published by United Nations Development Program (UNDP).

The number of accident events affecting ground structures is quite similar at global North and global South countries, but the number of ground casualties is substantially higher at global South countries as compared to global North ones, especially within short distances from the airports of origin or destination. This indicates that the challenges of aviation safety considering potential accidents around airports are larger and different at poorer, undeveloped countries of the global South than from those of the richer and more developed countries of the global North.

2. THE NORTH-SOUTH GEOGRAPHY

The end of World War II quickly established a new world geopolitical order, with western countries aligned with the United States and western European countries *versus* countries within the sphere of influence of the former Soviet Union. This changed the geopolitical balance of the world as, for over four decades both blocks challenged each other in the so-called "cold war", with local and limited disputes such as in the Koreas and Vietnam but never entering into direct conflict or using nuclear weapons against each other.

This triggered a series of theories and practices, institutionalized by the Conflict Resolution Movement, which involved several "think tanks" on the issue on the United States from 1956 to 1971 (Harty & Modell, 1991). A whole periodical – *The Journal of Conflict Resolution* – was dedicated to the matter, based on the thoughts of authors like Kenneth Boulding (1957) and Thomas Schelling (1960).

United Kingdom, France, Netherlands, Belgium and Italy set their former colonies free. The number of newly independent countries increased. Both Soviet Union and the United States-led coalition of western democratic states competed for hegemony in undeveloped countries in Latin America, Africa, the Middle East and Asia-Pacific. Some of these former colonies and long-time independent states migrated to the Soviet influence, such as Egypt, during the crisis of nationalizing the Suez Canal and then building the Aswan High Dam (Sant'Anna, 2015).

The Soviet Union collapsed a couple of years after the start of Glasnost and Perestroika (Gorbachev, 1987). It became clear that the key division of geopolitics was not exactly East *versus* West; rather it was North *versus* South.

In "North-South: a program for survival", the Independent Commission on International Development Issues chaired by (west)-Germany's former premier Willy Brandt, already highlighted this new, enduring and more complex division of the planet, shown on Figure 1.

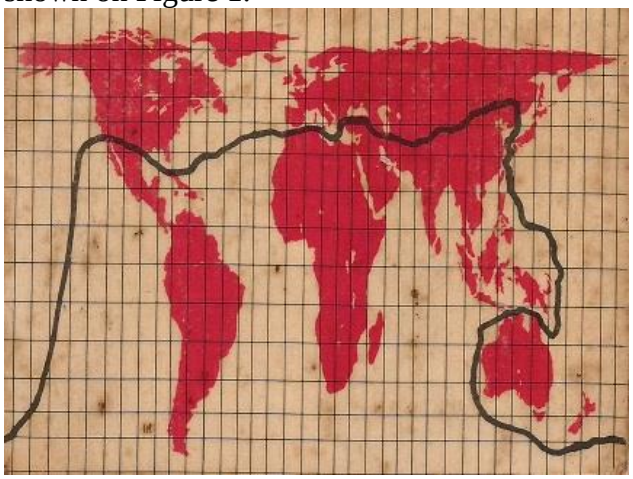


Figure 1 The North-South Division of the World Proposed by the Brandt Commission

This indicated North America (Canada and United States), the whole Europe (western and eastern), the former Soviet Union, Japan and Australia and New Zealand as "North" and the rest of the world – including Latin America and the Caribbean, Africa, the Middle East (including Turkey) and Asia Pacific (including the Koreas, China and India) as "South" (Brandt Commission, 1981).

Following the collapse of the Soviet Union, the terms "global North" and "global South" became quite common to refer to richer, more developed nations of the "North" (including Australia and New Zealand, both in Southern hemisphere) concentrating most the world's wealth, and "global South" with undeveloped and/or developing nations, where most of the world population live.

This is relevant in different aspects: first, as shown Figure 2, in 2012 the number of people living in cities outnumbered the number of people living in fields and rural areas; second the total population of people living in rural areas is expected to decrease in absolute numbers starting sometime between 2025 and 2030; third, most of the world population growth is expected to happen in cities and urban areas of the less developed regions, while the number of people living in cities and urban areas of more developed regions of the world is expected to stabilize, first with a slight growth and then with a potential reduction in absolute numbers (United Nations, 2015).

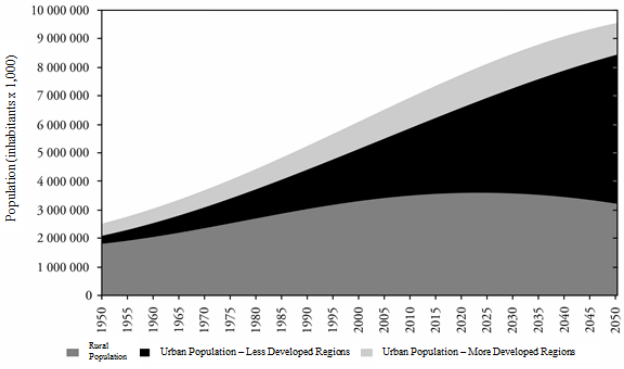


Figure 2 Population Growth Projected by the United Nations (actual 1950-2014; projections 2015-2050)

Although most commercial flights occur within the northern hemisphere (mostly among global North countries), most people in the world live in the global South –

increasingly in their cities – a significant growth of the number of flights is expected in the global South countries in the future. This justifies evaluating how airplane accidents affecting ground structures are geographically distributed between global North and global South as these groups of country may have different tools to successfully plan land use around their airports.

3. PLANE ACCIDENTS AFFECTING GROUND STRUCTURES

Safety is an intrinsic factor of civil aviation: air accidents are rare (Rose, 1992) due to a series of technological and regulatory improvements introduced over decades (Abeyratne, 1998). The number of accidents has decreased substantially over time. For example, 2017 had the lowest number of fatal accidents in several decades (ASN, 2022), despite the growth of aviation.

Most aircraft accidents happen on the flight phases of landing, final approach, take off and initial climb, which are closer to airports than the phases of flight of climb, *en-route* or at cruise speeds and altitudes, and initial descent (Boeing, 2021). Accidents also happen during the higher altitude and farther from airport flight phases, but rather less often and at times caused by factors out of control of the pilots, such as sabotage, high jacking, and terrorist bombings. These may be of interest of this study as their debris may fall onto ground structures, as the Lockerbie bombing of December 21, 1988 (ASN, 2022).

Error is part of human nature and even with technological improvements in the design and construction of airplanes (Angelucci, 1974) and navigation and flight control (Komons, 1989), they still happen. Complex systems (like aircrafts, air traffic control systems and even airports) have redundant control levels or structures which are designed to exceed the possibilities of single, individual faults. Several layers of control structures make the number of incident occurrences be as low as possible. Some incidents can go beyond the redundancy of the control structure, becoming accidents, and some accidents are fatal (Reason, 1990).

Even though aviation is the safest means of transport in terms of accidents per million operations and/or passengers x kilometers (Abeyratne, 1998), it is believed that the main procedures to increase safety that can be adopted in aviation are already in place. Safety procedures are mandatory practice in most countries, but there is a trend of flat asymptote from which the reduction of accidents should occur in a less intense way (Hart, 2004). Regardless all that, when air accidents occur, it is common for passengers to increase anxiety, triggering "an uncontrollable love-hate relationship between journalists from the popular media and professionals in the aviation sector" (Borfitz, 2001). It is likely that similar feelings happen with neighbors of airport when the accident crashes on its vicinities, affecting structures, goods and people on the ground.

Airplane crashes are part of what Barry Glassner (2003) called a "culture of fear": although the number of victims of plane crashes is very small, the coverage given by the press to each crash is enormous – especially by the local media. At the time of the introduction of jet aircraft (end of 1950's) there was one fatal accident for every 200,000 takeoffs; currently, there is not even one fatal accident for every 2 million takeoffs (Boeing, 2021). But "[air] accidents are profound psycho-economic occurrences" (Glassner, 2003, p. 317).

Modern society is not entirely risk-free; on the contrary, in 1986, Beck introduced the concept of "risk society" (Beck, 2010), in which the driving force would be the phrase "*I'm afraid!*", against the driving force phrase "*I'm hungry!*" of class society (Hier, 2003). Flying is one of the most anxious activities for people, and the fear of flying is not only manifested inside the planes, but also in the boarding process at airports. For Janic (2000), despite the growing perception that externalities (air pollution, noise, land use, water and soil pollution, waste management and access congestion) are important elements of the aviation system, risk and safety have always been present. Statistical risk is an exact science but personal risk perception is subjective (Slovic, 1987), relative (Renn, 2000), as well as psychosocially amplified (Kasperson, et al., 1988).

Between 2011 and 2020, takeoff and initial climb accounted for 2% of the total average flight time, but this is where 13% of fatal accidents occurred, causing 8% of fatalities; on final approach and landing, which corresponded to 4% of the average flight time, 54% of fatal accidents occurred, causing 40% of victims in air accidents (Boeing, 2021, p. 14). Takeoff and landing phases of flight take place inside airports, while the initial climb and final approach phases take place over their nearby vicinity.

Air crashes affecting structures on the ground are rare, but deaths of people who were not on the crashed planes (*ground casualties*) are not null, having a strong impact on the media (Glassner, 2003) and on the popular unconscious of the neighbors of the airports (Gordon, 2004).

Two airports were closed after accidents that caused many victims on the ground: *Grano de Oro*, in Maracaibo, Venezuela, and Medan-*Polonia*, in Indonesia. However, air accidents affecting structures on the ground are a minority, and throughout history (since 1919, when records of air accidents began, including World War II), 82,000 people died in planes, and 4,700 on the ground – including the nearly 2,800 victims of the September 11, 2001 attacks (ASN, 2022).

Thereby, the number of people who died in air crashes as well as ground casualties associated with such crashes along history is far smaller than that of people dying of the recent SARS-Cov-2 pandemics.

Given the augmented visibility by media coverage and the intrinsic need of aviation to keep a good safety track record, it is justifiable to investigate whether countries of the global North and the global South have similar patterns of aircraft accidents affecting man-made structures on the ground (events).

Given that land use planning around airports may be less effective in global South countries than in global North ones, it is also interesting to investigate the geographical distribution of ground casualties (fatalities).

Lastly, to justify the survey: “[statistics are] like bikinis: what they reveal is interesting but what they conceal is fundamental” (Dinning, 1953, p. 127).

4. METHODOLOGY

The database of Aviation Safety Network (ASN, 2022) was extensively analyzed: nearly 20,000 records of accident were reviewed. The analysis was performed in three batches: the first batch involved reading the accidents’ descriptions from 1945 to 2004 and contacting the webmaster with a spreadsheet summarizing ground casualties, which led him to include the number of ground casualties on the main page of the template of the descriptions, as applicable. This analysis was performed by the author from 2005 to 2007.

The second batch of analysis covered the period from 1919 to 1944, when the original database was complemented, and a third batch covering from 2005 to 2020 were both carried out from 2018 to 2021. This means that some new entries on each of these periods may have been added by the webmaster along time, and may not be included on this survey.

By reading every single accident description, the author discarded the cases of air accidents of planes that crashed on mountains, forests, sea etc., selecting those affecting man-made structures on the ground. It is important to state that there is no disregard to the pain of victims involved in accidents that did not affect structures on the ground; rather, it is solely a methodological filter as part of this study.

The selected accident descriptions were summarized in an MS Excel® spreadsheet. Each description takes one of the 833 lines with information spread on 25 columns.

These columns include: (A) a number of order, (B) the year of the record (1919 to 2020), (C) the number of events in that year, (column D) the date of the event, (column E) the closest airport’s name and (column F) its IATA or ICAO code. This was followed by the identification of the city of the event (Column G), country (column H), and air carrier name (column J). The following column (K) includes initials of the flight phase, which can be: en-route (EN), initial climb (ICL), takeoff (TO), landing (LD), approach (AP), taxiing (TXI), maneuvering (MN), standing (ST), and unknown (UNK).

Column L indicates the nature of the flight: domestic scheduled passenger (DSP), international scheduled passenger (ISP), domestic non-scheduled passenger (DNSP), international non-scheduled passenger (INSP), cargo, training, test, demonstration, ferry, and military (MIL).

Column M indicates if the event happened during daytime (with daylight), recording either Y = yes, N= No and UNK = unknown (when either the time is not shown on the accident description, or the hour of the day could not determine if it was during daylight or not due to the season of the year).

Columns N, O and P are filled by numbers of the people aboard (passengers and crew), the casualties of those aboard and the ground casualties (zero if no-one was killed on the ground despite some man-built structure being affected).

Column Q shows a brief description of the event and/or accident with somewhat standardized wording, while columns R and S indicate if the event happened outside or inside the airport site (accidents with the aircraft hitting but not passing through the airport's perimeter fence or wall were marked "X" on both columns).

For all cases of accidents outside the airport, column T shows a text describing the location of the event, which can be unknown (in cases of simpler and older accidents' descriptions), qualitative (depending on the interpretation of the description: far away, close to the airport, near the airport, very near the airport) or more specific, when an address or neighborhood is mentioned, or even the distance from runway end, from airport as a whole, sometimes with a numeric distance, in kilometers from such reference point. As a consequence, to facilitate filtering the cells of the spreadsheet, column U shows a quick indication of distance from the airport, which can be unknown (UNK), far away (FA), near the airport (N), very near the airport (VN), perimeter fence (PF), and the distance from the airport (with 0.1km precision).

The following columns V, W, X, and Y indicate the Maximum Takeoff Weight (MTOW) of the aircraft (as an indicator of its size, in case of possible correlation with the events or the ground casualties), and the Human Development Index (HDI) of the country where the accident happened.

MTOW was computed in metric tons from the reference of the aircraft description on the ASN data base (ASN, 2022).

The HDI is an indicator of quality of life computed by the United Nations Development Program (UNDP, 2018) for countries which considers (a) life expectancy at birth (years), (b) expected years of schooling (years), (c) mean years of schooling (years), and Gross National Income *per capita* (Potential Power of Purchase, in constant United States Dollars for 2017).

HDI is always a number between 0.000 and 1.000, being considered low as < 0.550, medium from 0.550 to 0.699, high from 0.700 to 0.799, and very high when > 0.800.

In this study, HDI values for 2017 above 0.800 (very high) were considered as global North countries, while all other values classified the country as part of global South.

Any of the 25 columns can be filtered, allowing ranking the spreadsheet in variables such as country, city, airport, aircraft type, air carrier, day/night, number of ground casualties, number of on-board casualties, distance from the airport (quick indication of distance and actual distance from the airport, in km), MTOW, country HDI, and country insertion as global North or global South. Results were both tabled and plotted in graphs to allow visual perception of their nature and geographical distribution.

5. RESULTS

Table 1 summarizes the information of 833 accident events' records affecting ground structures from 1926 to 2020 (there were no such cases from 1919 to 1925). Of these, 327 cases affecting ground structures had the effective distance from the airport known (or determined by identifying an address or location indicated at the accident's description based on Google Maps®), with distances ranging from 0.1km to 45.0km. Correlations with several variables were tested: MTOW, the country itself, the country's HDI, and the country's insertion as global North and global South, based on HDI being very high (>0.800) or under this threshold.

Turkey is the only country that shifted from global South at the Brandt Commission report (see **Figure 1**) to global North considering its HDI value.

Table 1 Summary of Information on Accidents Affecting Ground Structures, 1926-2020

Distance from Airport	*Number of Cases*	*% of the Total*
Unknown	107	12.85%
Within the Airport Site	195	23.41%
Far Away from the Airport	45	5.40%
Near the Airport	48	5.76%
Very Near the Airport	87	10.44%
Hitting Perimeter Fence	24	2.88%
Distance or Location Indicated (km or address/name)	327	39.26%
Total Accidents Affecting Ground Structures	833	100.00%

Source: computed by the Author based on (ASN, 2022)

Figure 3 shows the dispersion of distances that could be established in relation to the airport of origin and/or destination, of all the 327 cases with known distance from the airport.

Most of the events and fatalities were close to the airports: 60% of the accumulated cases and 70% of the accumulated ground casualties happened within a 2 km range from the airport. As the graph is clearly asymptotic, 80% of accumulated events and ground casualties are found to have occurred within a 6.0 to 7.0km distance from the airport, while 90% of both events and ground casualties accumulate between 10.0 and 11.0km from the airport.

Aircraft MTOW does not reveal an important correlation with the number of victims, nor does the HDI of the country in which the accident occurred. However, the inclusion of the countries in which the events occurred (fatal or not for people on the ground) in the global North and global South categories shows important results: despite the events in global North countries being slightly higher than those in global South countries (52.91% against 47.09%), the number of victims on the ground is much higher in countries of the global South (75.14% of the total) than in countries of the global North (24.86%), as can be seen in Table 2.

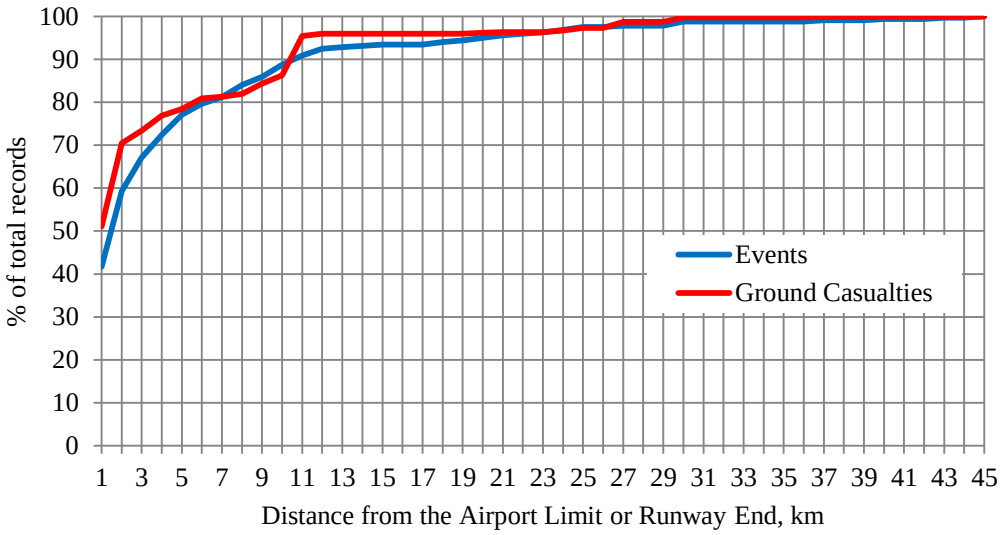


Figure 3 Accumulated Dispersion of Events and Ground Casualties *versus* Distance from the Airport (km)

Source: Computed by the Author, based on (ASN, 2022)

Figure 4 plots the total fatalities on the ground in the intervals of Table 2 divided by the number of kilometers involved in the interval, showing the much higher lethality of such accidents when occurring in global South countries, despite the number of accidents in these countries being quite similar to the accidents that occurred in the countries of the global North.

Finally, Table 3 summarizes the 20 worst accidents ranked by the number of ground casualties, not including the events of September 11, 2001, which were result of premeditated terrorism.

Table 2 Distribution of Events and Ground Casualties *versus* Distance Intervals from the Airport, Global North and Global South

Distance Interval	*Total*				*Global North*				*Global South*			
	Events		*Casualties*		*Events*		*Casualties*		*Events*		*Casualties*	
	Nr.	*Σ*	*Nr.*	*Σ*	*Nr.*	*Σ*	*Nr.*	*Σ*	*Nr.*	*Σ*	*Nr.*	*Σ*
0.1-1.0km	137	137	959	959	70	70	119	119	67	67	840	840
1.1-2.0km	59	196	333	1.292	33	103	109	228	26	93	224	1.064
2.1-3.0km	25	221	51	1.343	12	115	8	236	13	106	43	1.107
3.1-4.0km	17	238	60	1.403	8	123	6	242	9	115	54	1.161
4.1-5.0km	15	253	26	1.429	8	131	6	248	7	122	20	1.181
5.1-10.0km	37	290	141	1.570	20	151	76	324	17	139	65	1.246
10.1-20.0km	21	311	162	1.732	12	163	64	388	9	148	98	1.344
>20km	16	327	66	1.798	10	173	59	447	6	154	7	1.351

Source: Computed by the Author, based on (ASN, 2022)

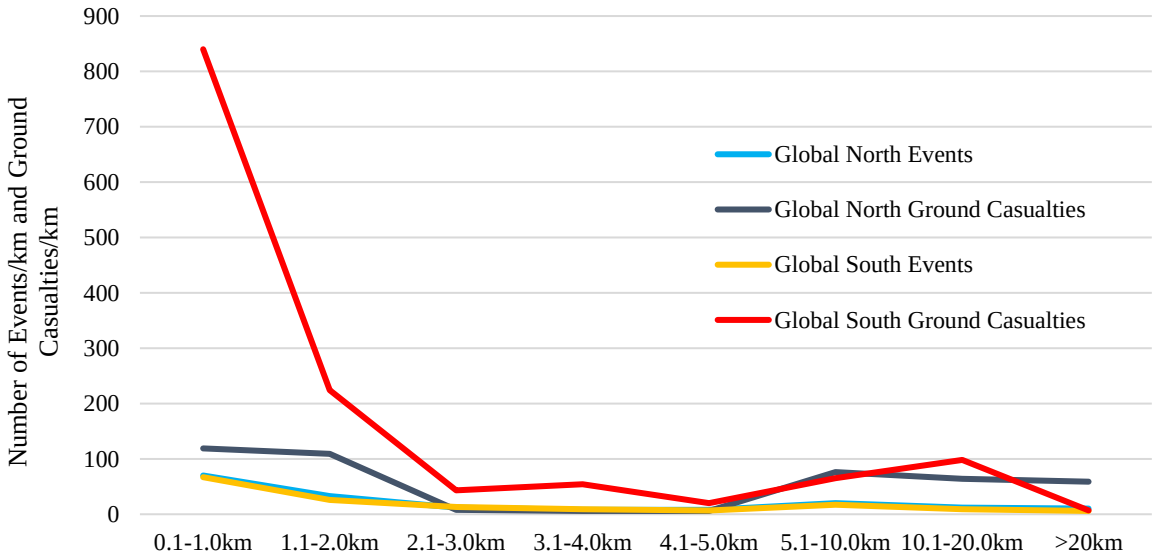


Figure 4 Number of Events/km and Number of Ground Casualties/km *versus* Distance Intervals from the Airports, Global North, and Global South

Source: Computed by the Author, based on (ASN, 2022)

Excluding the intentional attacks of September 11, 2001, the worst record is that of an overweight cargo plane that failed to take off from Kinshasa-*N'Dolo* airport in Congo Democratic Republic in 1996, killing 237 people at a street market 600 meters from the runway threshold – no-one was killed aboard (ASN, 2022).

The worst cases in the global South involve crashes over residential areas less than 2.0km from the airport of origin or destination. On the other hand, in the global North, the most lethal accidents occurred within the aerodrome or more than 10km from it, where it seems unreasonable to provide safety buffer areas.

Another notable result of the MS Excel® spreadsheet selecting only the events affecting ground structures from the original ASN database is that, despite accidents at airports such as Kinshasa-*N'Dolo* airport being very lethal, the airport with the highest frequency of accidents affecting ground structures (including non-fatal accidents) is São Paulo-*Congonhas*, with 11 events in the database (5 fatal, totaling 27 ground casualties, with the worst accident killing 12 people on the ground in July 17, 2007). Next comes the former

Quito-*Mariscal Sucre* airport (7 events, 4 of which were fatal, the worst with 49 victims out of a total of 64 fatalities on the ground), and Guatemala City-*La Aurora* airport, with 7 events, of which 3 were fatal, causing 24 casualties (the worst event with 16 casualties on the ground) (ASN, 2022).

Table 3 Summary of More Lethal Accidents Affecting Ground Structures, Ranked by Ground Casualties of Each Event

Ground Casualties	*City/Airport*	*Country*	*Global Insertion*	*Year*	*Distance from Airport*	*Comments*
237	Kinshasa -*N'Dolo*	D.R. Congo	South	1996	0.6km	Overshot the runway and hit a market
109	Kinshasa -*N'Djili*	D.R. Congo	South	2000	In the Site	Military ammunition explosion
107	Da Nang	Vietnam	South	1966	2.0km	Crashed on 66 houses
88	Santa Cruz de La Sierra-*Viru Viru*	Bolivia	South	1976	0.6km	Crashed on houses and a football field
87	Ankara-*Esenboga*	Turkey	North	1963	10.5km	Crashed on houses at the Ulus neighborhood after a flight collision
85	Lvov-*Smilow*	Ukraine	North	2002	In the Site	Aerobatic accident at air show
78	Kano-*Amimu*	Nigeria	South	2002	0.8km	Hit 23 houses, 1 school and 1 mosque
71	Maracaibo-*Grano de Oro*	Venezuela	South	1969	1.0km	It hit electrical wires and fell on houses
49	Quito-*Mariscal Sucre*	Ecuador	South	1984	0.5km	Crashed on 25 houses
47	Medan-*Poland*	Indonesia	South	2005	0.3km	Crashed on a residential area
45	Irkutsk	Russia	North	1997	1.6km	Crashed on a residential area
44	Seoul-*Yeouido Base*	South Korea	South	1967	Next	Crashed on neighboring slums
44	Mexico-*Benito Juarez*	Mexico	South	1987	Unknown	Crashed on the Mexico- Toluca road
39	Amsterdam-*Schiphol*	Netherlands	North	1992	11.0km	Crashed on a building in Bijlmermeer
37	Goma	D.R. Congo	South	2008	0.1km	Crashed on a residential area
35	Bishkek-*Manas*	Kyrgyzstan	South	2017	1.9km	Crashed on a trailer parking lot
32	Munich-*Riem*	Germany	North	1960	8.7km	Crashed on a crowded streetcar
32	Beijing-*Xijiao*	China, PRC	South	1979	Unknown	Crashed on a factory
28	Kinshasa-*N'Djili*	DR Congo	South	2007	2.0km	Crashed on a residential area
25	Svetlogorsk-*Hrabovo*	Russia	North	1972	27.0km	Crashed on an elementary school playground
25	Brazzaville-*Maya Maya*	Congo	South	2012	1.0km	Crashed on a residential area
24	Nha Tang	Vietnam	South	1969	Very Near	Crashed into homes and schools after onboard bomb blast
23	Fayetteville-*Air Base*	USA	North	1994	In the Site	Soldiers hit by military plane
23	Blanket	Ecuador	South	1996	4.0km	Crashed on houses and restaurant
22	Wichita-*Air Base*	USA	North	1965	11.0km	Crashed on a street
22	Medellin-*Enrique Olaya Herrera*	Colombia	South	1963	Unknown	Crashed on a factory building after hitting electrical wires
22	Sao Paulo-*Guarulhos*	Brazil	South	1989	2.0km	Crashed on a slum before the runway
20	Asunción-*Silvio Pettirossi*	Paraguay	South	1996	2.0km	Crashed on an amusement park

6. CONCLUSIONS

Aviation Safety Networks (ASN) is a complete and very reliable database with nearly 20,000 accident descriptions from 1919 to date. All these entries were reviewed, allowing the selection of 833 entries which affected some kind of man-made ground

structure. The profiles of these descriptions included eventual ground casualties – i.e., death of people who were not aboard the aircrafts involved in these accidents.

As safety around airports is one of the key worry factors of their neighborhoods, the selected data was organized in a spreadsheet allowing filtering and ranking the data of the 833 entries according to several variables, including distance from airports of origin and destination and the geographical distribution in terms of the global North (most rich and developed countries) and global South (most populated but less developed countries). These 833 entries include 1,798 casualties, not considering the nearly 2,800 casualties of the terrorist attacks of September 11, 2001.

The proximity of events and ground casualties on these accidents relative to the closest airports could be precisely determined in 327 entries, identifying the distance from the airports or the airports' runway end.

Half of the cases and 70% of all affecting ground structures at a known distance from the closest airports happened within 2km from the airports or their runway ends. Casualties and events concentrate 80% of the cases from 6.0 to 7.0km from the airports, while 90% happened within 10.0 to 11.0 km from them.

In terms of geographical distribution considering countries part of the global North and global South (according to their Human Development Index), the number of events is fairly balanced (52.91% on the former and 47.09% on the latter), but the number of ground casualties is not: 75.14% of the ground casualties happened in accidents in countries of the global South, with the remainder 24.86% happening in countries of the global North. Global South countries concentrate most of the ground casualties within the Aviation Network database.

Democratic Republic of Congo alone counts 411 ground casualties, followed by Vietnam, with 131 fatalities and Bolivia, with one single event claiming 88 lives on the ground.

The airports with more frequent events affecting ground structures off from the airport site are São Paulo-Congonhas, Quito-Mariscal Sucre (old airport, now defunct) and Guatemala City-La Aurora, all in countries of the global South (Brazil, Ecuador and Guatemala, respectively), but none of these are among the deadliest events or airports of the survey.

Most of the more lethal accidents in the global South and the vast majority of the ground casualties are identified within 2.0km from the airports or their runway ends. On the other hand, the deadliest events in countries in the global North recorded ground casualties at least 10.5km off from the airport, or within the airport site in acrobatic airshows, where there is little action by urban planners to diminish risk.

Twenty-eight events caused more than 20 ground casualties each, totaling 1,500 ground casualties – 83.43% of the total excluding the victims of the September 11, 2001 terrorist attacks. Only 8 of these 28 more lethal events happened at countries of the global North; the other 20 events happened in countries of the Global South.

This indicates that the vicinities of airports in the global South are far riskier than those of airports in the global North. As global South cities tend to grow in population far more than global North cities, there might be more complex challenges for urban planners and for airport authorities in the future.

References

Abeyratne, R. (1998). The regulatory management of safety in air transport. *Journal of Air Transport Management, 1*, pp. 25-37.

Angelucci, E. (1974). *Os aviões: dos primórdios da aviação atér os dias atuais; a participação brasileira na conquista do espaço.* São Paulo: Melhoramentos.

ASN. (2022). *Aviation Safety Network*. Fonte: Aviation Safety Network database: https://aviation-safety.net/database

Beck, U. (2010). *Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade.* São Paulo: Editora 34.

Boeing. (2021). *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents:*

Worldwide Operations, 1959-2020. Seattle: Boeing Corporation.

Borfitz, M. (2001). *Journalism and aviation: perceptions and the media - the power of media.* s.l.: Safe Skies International.

Boulding, K. E. (1957). Organization and conflict. *Jopurnal of Conflict Resolution, 1*(2), pp. 122-134.

Brandt Commission. (1981). *North-South: a Program for Survival.* Cambridge (MA): MIT Press.

Dinning, R. G. (1953). Integration of Airport and Municipal Planning. *Journal of the American Institute of Planners, 19*(3), pp. 124-130.

Glassner, B. (2003). *Cultura do Medo.* São Paulo: Francis.

Gorbachev, M. (1987). *Perestroika - New Thinking for Our Country and the World.* New York: Harper & Row.

Gordon, A. (2004). *Naked Airport: a cultural history of the world's most revolutionary structure.* New York: Metropolitan Books.

Hart, C. (2004). Stuck on a Plateau - a Common Problem. In: J. R. Phinister, V. M. Bier, & H. C. Kunreuther, *Accident Precursor Analysis and Management: Reducing Technological Risk Through Diligence* (pp. 147-154). Washington (D.C.): National Academy of Engineering.

Harty, M., & Modell, J. (1991). The First Conflict Resolution Movement, 1956-1971: an attempt to institutionalize applied interdisciplinary social science. *Journal of Conflict Resolution, 35*(4), pp. 720-758.

Hier, S. P. (2003). Risk and panic in late modernity: implications of converging sites of social anxiety. *British Journal of Sociology, 34*(1), pp. 3-20.

Janic, M. (2000). An assessment of risk and safety in civil aviation. *Journal of Air Transport Management, 6*(1), pp. 43-50.

Kasperson, R. E., & et al. (1988). The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework. *Risk Analysis, 8*(2), pp. 177-178.

Komons, N. (1989). *Bonfires to Beacons: Federal Civil Aviation Policy under the Air Commerce Act, 1926-1938.* Washington (D.C.): Smithsonian Institution Press.

Reason, J. (1990). *Human Error.* New York: Cambridge University Press.

Renn, O. (2000). Risk Perception and Risk Management: A Review - Part 1: Risk Perception. *Risk Abstracts, 7*(1), pp. 1-7.

Rose, N. L. (1992). Fear of Flying? Economic Analyses of Airline Safety. *Journal of Economic Perspectives, 6*(2), pp. 75-94.

Sant'Anna, I. (2015). *O Terceiro Templo: os conflitos árabe-israelenses e os choques do petróleo.* Rio de Janeiro: Objetiva.

Schelling, T. C. (1960). *The Strategy of Conflict.* Cambridge: Harvard University Press.

Slovic, P. (17 de April de 1987). Perception of Risk. *236*, 280-285.

UNDP. (September de 2018). *United Nations development Program*. Fonte: Human Development Index: https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index

United Nations. (2015). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision.* New York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

POPULATION DENSITIES AND REAL ESTATE DEVELOPMENT ON THE ALIGNMENT OF SÃO PAULO'S CONGONHAS AND GUARULHOS AIRPORTS' RUNWAYS: THE REPLICATION OF A CONFLICTUAL FATE

Luiz Henrique Werneck de Oliveira
Ph.D., Territory Planning and Management, M.Sc. Civil-Hydraulic Engineering, B.Sc. Sanitary Engineering, B.Sc. Social Sciences
PGT-UFABC; Zukunft Consulting

*** Corresponding author e-mail address**: luizwerneck64@gmail.com

PAPER ID: SIT215

ABSTRACT

Urban development surrounding commercial airports is a conflictual factor that hampers airport operations and ultimately prevents it to expand its infrastructure. São Paulo is a 12 million city with 22 million people on its metropolitan areas and is served by the more central Congonhas Airport (22 million passengers in 2019) and the larger, international Guarulhos airport (46 million passengers in 2019). Congonhas has been completely surrounded by urban development and the hypothesis of this study is to verify to what extent the same process is happening around Guarulhos. This study investigates data on population density on runway alignments as well as the trend of real estate development from 1985 to 2013 by using Geographical Information Systems' "heat maps". The 2010 population was computed in Census sectors within 10km radius from both airports. Real estate development of both aligned and dis-aligned radial rings from 0-2km, 2-4km, 4-6km, 6-8km and 8-10km radius were computed in several 5 (and 4) years' periods. Results show intense real estate development northwest of Congonhas from 1985 (the year of Guarulhos airport opening) to 2004, with a similar pattern the western alignment of Guarulhos airport' runways since 2005. High population densities are noted in 2010 also south of Congonhas and east of Guarulhos airports, where little or no real estate development was noted within the 1985-2013 period, thereby representing informal dwellings. Evidence shows that the same urban development conflicting with Congonhas Airport is being replicated in the vicinity of Guarulhos airport, already surrounded by urban development and unable to expand its runway systems, restricting capacity of São Paulo's airports system. These facts put further challenges both for airport and urban planners to increasing airport capacity at São Paulo.

Keywords: São Paulo (Brazil), Congonhas Airport, Guarulhos Airport, Urban Sprawl, Real Estate Development.

ACKNOWLEGDEMENTS

The author thanks Mr. Renato Machado for the help with GIS figures.

1. INTRODUCTION

Civil aviation and urban sprawl increased their growth paces simultaneously over the past decades. Earlier airports were built in what once were the fringes of the cities they served. After World War II flying became more popular and civil aviation grew. Airports built in the 1920's and 1930 later needed longer runways. In some cases, airports' expansion was impossible due to urban development around them. The advent of jet aircraft increased the pressure for longer runways. Upon facing limits to expand their original airports to tap growing demand, some cities created multiple airport systems: the original, with smaller facilities and closer to the city center dealing with regional flights, and newer and larger airports farther away from the city center, dealing with long distance flights.

Despite the availability of larger airport facilities for long distance flights, some central airports serving the same metropolitan markets are busier than ever. This causes negative impacts as their surrounding neighborhoods are fully urbanized and densely populated. Together with real estate development pressures, these high population densities within the area of influence of either central or non-central airports lead to neighborhoods that are less compatible with airport activities.

This article addresses the case of São Paulo, Brazil, a city with 12 million people in a metropolitan area totaling 22 million, served by two large commercial airports: Congonhas (22 million passengers in 2019) and Guarulhos (46 million passengers in 2019). A georeferenced survey mapped population densities based on 2010 Census and new housing development from 1985 to 2013 on an Alignment Radial Model (ARM) model, indicating that urban development in São Paulo is in disregard of its airports' runway alignments. Evidence shows that the same urban development struggle against Congonhas in the past is on-going in the vicinity of Guarulhos airport, already surrounded by urban development and unable to expand its runway systems, restricting capacity of São Paulo's airports system. These facts put further challenges both for airport and urban planners to increasing São Paulo's airport capacity.

2. BUSY CENTRAL AIRPORTS

The increasing distance of new airports from the center of the cities they serve has been subject of a study in the past, both in the case of a new airport replacing an older one, and on the case of the new airport forming an airport system along with the original airport (Werneck de Oliveira, 2019).

Many airport systems are formed by a hegemonic airport and smaller reliever and or competing airports, such as London, Los Angeles and Moscow. There are also many airport systems where the secondary airport is a smaller airport dedicated to the traffic of Low Cost Carriers (Calder, 2003). On the other hand, there are 14 airport systems in which a central airport movements more than 10 million passengers per year (MPax/y) and one or more complementing airports are less hegemonic in terms of passengers' yearly throughput, thus creating systems where the closure of one airport would probably drive the market to a collapse or severe restriction. Thereby thus these systems depend upon the operations of their central airports as well as the other airports on their system.

Table 1 shows these systems with their cities and central airport name and 2019 MPax/y compiled by the author based on their airport authorities and/or country statistics sites, as well as the other farther or newer airport forming their airport systems.

Out of these 14 airport systems, Tokyo and Tehran are the only ones with their newer and farther away airports processing less yearly passengers than their older, original and smaller, more central airports, although this situation has happened in recent years both at Buenos Aires' and at São Paulo's airports systems. Also on very particular way, the airport systems of New York and Washington, DC, are formed by more than 2 airports, with the 3rd one being rather important to tap their metropolitan markets.

These systems' central airports are important players on their local markets but, as they were implemented many decades ago, their cities may have grown to surround them by urban development, hence creating conflicts with their neighbors (even if the airports got there first).

Table 1 Airport Systems Depending on Central Airports and their Passengers Patronage (2019)

City	*Airport*	*MPax/y*	*Airport*	*MPax/y*
Tokyo	Haneda	87.4	Narita	42.4
Shanghai	Hong Qiao	45.6	Pudong	76.2
Bangkok	Don Mueang	41.3	Suvarna-bhumi	65.4
Paris	Orly	31.9	Ch. De Gaulle	76.2
New York(*)	La Guardia	30.7	John F. Kennedy	62.3
Seoul	Gimpo	25.4	Incheon	71.2
Washington (*)	Reagan-National	23.2	Dulles	23.8
São Paulo	Congonhas	22.0	Guarulhos	46.2
Chicago	Midway	20.2	O'Hare	81.8
Osaka	Itami	16.5	Kansai	31.8
Dallas	Love Field	16.2	Dallas-Fort Worth	71.6
Tehran	Meharabad	14.3	Iman Khomeini	7.4
Houston	William P. Hobby	14.1	Georg Bush Intercont'l	43.8
Buenos Aires	Aeroparque Jorge. Newberry	12.3	Ezeiza-Ministro Pistarani	12.7

(*) New York System also depends on Newark-Liberty (46.2MPax/y in 2019) and Washington's also depends on Baltimore-Thurgood Marshall (26.4MPax/y in 2019

3. THE CASE OF SÃO PAULO AIRPORT SYSTEM

São Paulo is the largest city in the Southern hemisphere. It has 12 million people, and its metropolitan area has 22 million people (IBGE, 2022). The city's Gross Domestic Product (GDP) was US$ 217 billion in 2015 (10.8% of Brazil's GDP), while the metropolitan area's GDP was US$ 352.3 billion - 17.6% of Brazil's 2015 GDP (SEADE, 2018). Figure 1 shows a map of São Paulo's Metropolitan area and its insertion in São Paulo State and Brazil with its 2 commercial airports.

São Paulo has immense social disparities: 18.9% of the metropolis' dwellers lived in slums in 2010 (IBGE, 2013). It is among the largest cities hampered by severe housing deficit (Davis, 2006). On the other hand, it hosts the world's 2nd largest helicopter fleet, which Graham and Marvin (2001) call "the ultimate commute". On the edge of the 20th century, it was an example of a networked city for the wealthy, resulting in social exclusion (Silva, 2000) of those who Harvey (2012) calls the "disadvantaged".

São Paulo opened its first airfield – Campo de Marte, 3 km north of the city center – in 1920. In 1929 a severe flood had it halt operations for four months. In 1932 a revolution attempt led federal forces to bomb it, resulting on its closure until 1934. At that time, state-of-the-art aircrafts such as the Junkers-52 and the Douglas DC-3 already called for paved runways (Mello, 2006).

Due to the constant flooding of Campo de Marte, in 1936 the privately-owned "Auto-Estradas" Real Estate Development Company opened a new, public aerodrome 9 km south of the city center. The new aerodrome, named Congonhas, soon received paved runways and was accessible by a paved toll road (also owned by "Auto-Estradas"). The company also had the right to develop most of the surrounding neighborhoods (Santos, 1985). The earlier zoning ordinances treated the airport itself as an exceptional case within local zoning, as its vicinities were dedicated exclusively for residential development (Feldman, 2005). Early, dispersed industries nearby Congonhas would later be replaced by high rise buildings of *Moema* neighborhood. Therefore, 30 years after opening, Congonhas airport was surrounded by urban sprawl, mostly residential development (Beiguelman, 1996).

Until World War II, Congonhas processed 50,000 passengers per year in 5,000 flights. In the 1950's, the number of passengers increased to 1.5 million per year, with 91 thousand flights in 1959. In 1981 it processed 6.2 million passengers, 134.5 thousand flights and 69 thousand tons of cargo (Mello, 2006).

The combination of its relatively short runway (1,940 meters) and high elevation (802 meters) prevented larger jets to operate long-distance flights. Most international passengers from São Paulo heading abroad had to fly to Rio de Janeiro to change planes to long-distance flights there, or had to use the Campinas-Viracopos Airport, operational since 1960, but located 90 km away.

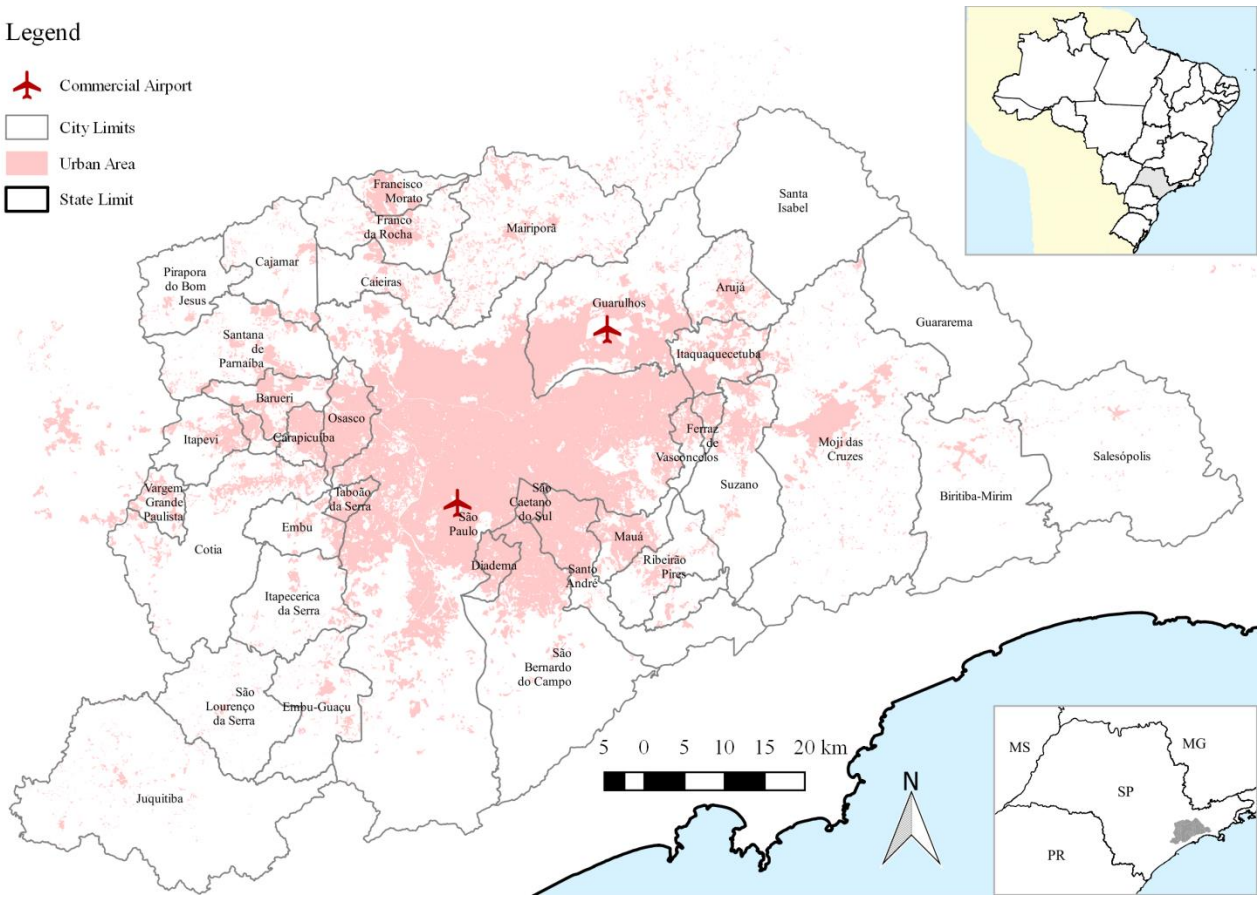


Figure 1: São Paulo Metropolitan Area and its Insertion in São Paulo State and Brazil

Thus, an international airport was planned for the city as Congonhas' runways could no longer be extended. After a poorly documented (Santos, 1985) but surprisingly pluralistic debate during military ruling in Brazil (CONDEPHAAT, 1978), the site adjacent to São Paulo Air Base was selected to develop the current São Paulo-Guarulhos International Airport, which opened in 1985, 25 km northeast of São Paulo's city center (GRU-Airport, s.d.).

Nevertheless, the city continued having two airports with commercial operations, which had their traffic systematically growing over the past three decades. Figure 2 shows the evolution of increasing passengers processed by the two commercial airports of São Paulo altogether, from 1981 to 2017.

It is worth noting that after the opening of Guarulhos Airport in 1985, most flights were transferred to it and Congonhas remained a rather idle regional airport. However, domestic flights to/from Congonhas were soon again scheduled to nearly all Brazilian major cities, allowing passengers flying from South to North or Northeast of the country changing planes at Congonhas instead of Guarulhos. As a result, from this domestic hub-like structure at Congonhas rather than at Guarulhos, from 2001 to 2007, the former's throughput surpassed that of the latter. Figure 3 shows the evolution of passengers processed by both airports from 1981 to 2017.

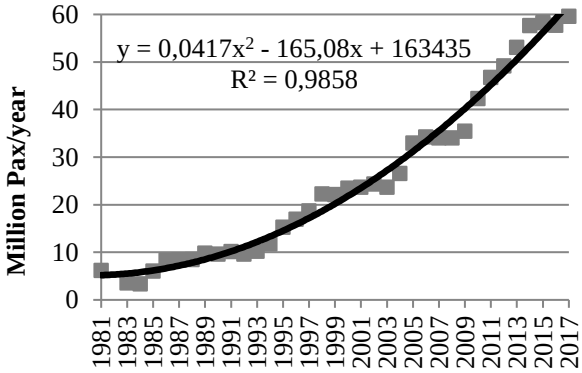


Figure 2: Passengers Processed by São Paulo's Two Commercial Airports, 1981-2017

In July 17, 2007, a fully-loaded and fueled Airbus A-320 overshot Congonhas' wet and slippery runway when landing and crashed onto a building adjacent to the airport, killing 187 people on board and 12 on the ground (ASN , 2022). This led to new restrictions regarding the use of the runway length, maximum pay-load,

with the prohibition of connections and long distance domestic flights to/from Congonhas.

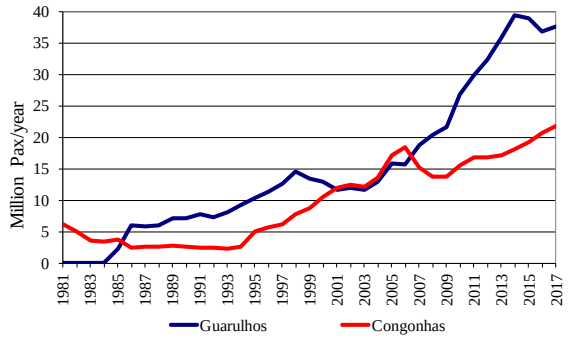


Figure 3: Passengers Processed by São Paulo's Congonhas and Guarulhos Airports, 1981-2017

During the boom of Brazilian civil aviation growth from 2004 to 2013, Guarulhos Airport took the lion's share in São Paulo's area, while Congonhas maintained growth at lower pace. Due to the Brazilian economic demise since 2015, however, Guarulhos' patronage literally diminished, while Congonhas was the country's only airport recording yearly growths.

On the other hand, Brazil's economy recovered slightly in the following years, and aviation kept growing, especially the passenger and aircraft movements of São Paulo's airports. While experiencing economic and airports' patronage growth so does real estate development in the cities they serve.

Given that Congonhas airport was built in order to sell urban plots around it, the main objective of this study was to evaluate if indeed a culture of building residences around airports has been established in São Paulo, by comparing commercial real estate development indicators with formal and informal self-construction and shanty towns (slums) both in the alignment and off from the alignment of São Paulo's two Commercial airports – Congonhas and Guarulhos International.

4. METHODOLOGY

Population densities both in the runways' alignment and off from it were surveyed based on the Brazilian 2010 (most recent currently available) official Census (IBGE, 2010). The evolution of new housing, Real estate development set for sale from 1985 to 2013 was based on a database by the Center for Studies of the Metropolis (CEM, 2018), not including self-constructed houses nor shanty or even brick-built subnormal slums which houses 18.9% of the metropolitan population (IBGE, 2013).

Mapping was applied around São Paulo's Congonhas (central) and Guarulhos International (non-central) airports' sites. It was decided not to map the city's general aviation airport (Campo de Marte) due to its relatively smaller size and its relative proximity with both Congonhas and Guarulhos airports.

For the mapping, an Alignment Radial Model (ARM) was applied, evolving from a previous methodological test (Werneck de Oliveira, 2018), but employing Geographical Information Systems (GIS) tools and considering runway alignment, as aviation's main negative impact – aircraft noise – is more linear along flight paths than radial. Hence, the ARM was phased on a 45° angle from the runway alignment, thus forming two "bow-tie" shapes: one set (two quarter of circles) aligned to dominant runways (both headings); the other set (two converse quarter-circles) dis-aligned (sideways) to the runways.

Off from the center of each airport site, a series of concentric circles were drawn at every 2 km, from the center up to 10 km. Each circle and/or ring was divided in 3.14 km^2 "*iso-areas*". The inner circle/first ring (0-2 km) has 4 "*iso-areas*", the second ring (2-4 km) has 12, the third ring (4-6 km) has 20, the fourth ring (6-8 km) has 28, and the fifth and last, outer ring (8-10 km) has 36 "*iso-areas*".

This totaled 100 "*iso-areas*" or sectors with 3.14 km^2 each for the two airports, half aligned to the runway headings and half sideways to it. Congonhas' runways headings are 17/35 and Guarulhos' are 09/27. Both airports have two parallel runways, but too close to each other, not allowing independent and/or simultaneous operations. The ARMs were thereby centered amid their runways.

Brazilian Civil Aviation Regulation (RBAC) number 161 (ANAC, 2019)suggests a buffer "area of influence" where noise levels up to 75 dB and 65 dB are tolerated and hence indicate compatible and non-compatible land uses within them. This was, however, dropped as this regulation includes somewhat small areas within noise restrictions (*e.g.* less than 1 km from each runway end for 65dBa).

Specific layers were developed on GIS software (ArcGIS version 12 for "cuts and joins" and QGIS version 2.18.21 for mapping) using SIRGAS 2000 (UTM23S) reference for the airports' site limits, their runways' alignment, their coordinates in latitude and longitude, and the ARMs with the "*iso-areas*".

Geo-referenced data from the Brazilian Population Census of 2010 - population per Census district areas (IBGE, 2010) generated another layer, while data from the CEM (2018) regarding new residential market real estate development from 1985 to 2013 generated yet another layer (weighted for total residential units rather than for total enterprises set for sale in the market, as these include many high-rise buildings, with multiple residential units in one enterprise). Unfortunately, no similar, georeferenced data from 2014 onwards was identified.

The number of residential units set for sale in the market was grouped and analyzed using dynamic tables' tool at MS Excel® spreadsheets with binary coding (1 = aligned; 0 = dis-aligned to runways). It is friendlier and faster to group data in the aligned and dis-aligned "*iso-areas*", allowing faster decision-making for the mapping, provided the code of the attribute table is always preserved to allow proper mapping when back to GIS software. Real estate development data were gathered in periods as follows: 1985-1989, 1990-1994, 1995-1999, 2000-2004, 2005-2009, and 2010-2013 (the only group with 4 years instead of 5).

5. RESULTS

Figure 4 shows the yearly distribution of number of residential enterprises and residential units reaching the market from 1985 to 2013, showing often coinciding peaks and valleys. The average number of residential units per enterprise is 57.07, with a Standard Deviation of 11.69 units.

The overlay of the ARM and population density data from official census (IBGE, 2010) allows verifying if this variable depends on the runway alignments of these two airports. These overlays are illustrated in Figure 5, which shows the densities of the Census' Districts (practically always smaller than the "*iso-areas*", thereby resulting quite higher density peak-values).

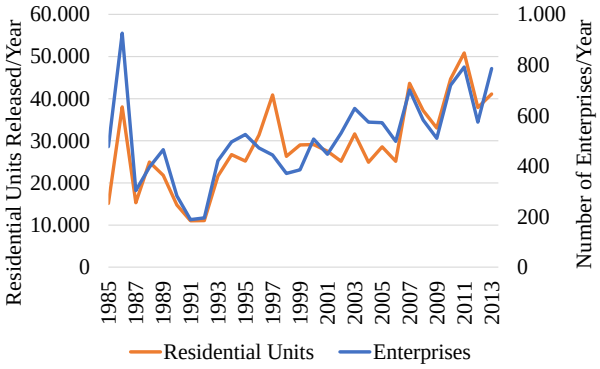


Figure 4: Annual Evolution of New Residential Enterprises and Units in São Paulo's Two Airport's Influence Areas, 1985-2013

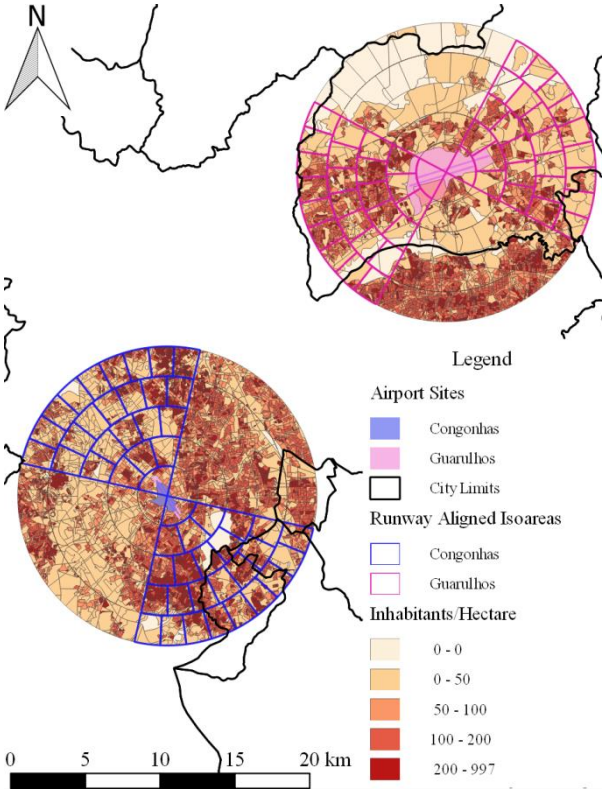


Figure 5: Overlay of ARM and Population Densities per Census Districts Aligned and Dis-Aligned with Congonhas and Guarulhos Airports Runways

The aligned and dis-aligned "bow-ties" and the ARM allows viewing how population density varies with runway alignment and distance (0-10km) from each airport site center, by "*iso-areas*" and Census Districts.

The other variable herein studied – the number of new residential units (houses and/or apartments) set for sale on the local market from 1985 to 2013 – has its overall statistics shown in Table 2. In this period, approximately half a million new dwellings were built and set for sale on the local real estate market within a 10 km-radius influenced by São Paulo's two commercial airports (85% around Congonhas and 15% around Guarulhos Airport).

Table 2: Number of New Residential Units (Houses and Apartments) Built and Set for Sale in the Market within the 10 km Radius from São Paulo's Commercial Airports, 1985-2013

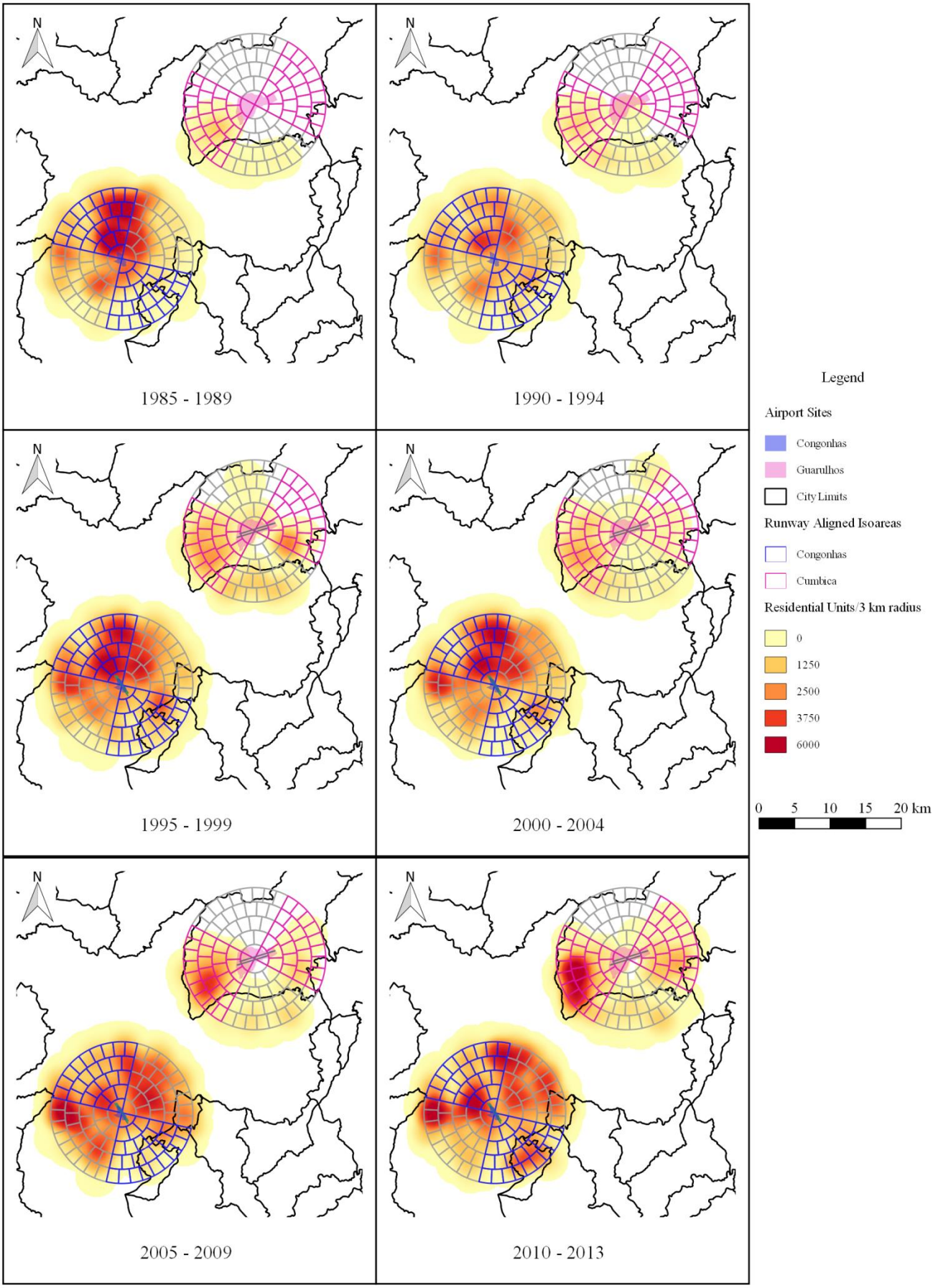
Airport	Runway	Distance from City Center		Period						Total
				1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2013	
Congonhas	Aligned	R1	0-2 km	2,140	705	833	801	1,566	745	6,790
		R2	2-4 km	10,103	6,086	8,086	7,017	4,978	6,101	42,371
		R3	4-6 km	6,413	5,151	8,360	7,058	5,363	6,386	38,731
		R4	6-8 km	8,379	4,180	11,327	9,445	6,349	5,515	45,195
		R5	8-10km	7,457	5,397	8,747	8,384	8,570	13,350	51,905
		Subtotal		34,492	21,519	37,353	32,705	26,826	32,097	184,992
	Dis-Aligned	R1	0-2 km	1,522	1,014	2,142	1,106	2,166	2,350	10,300
		R2	2-4 km	6,211	4,470	6,418	6,514	5,870	6,604	36,087
		R3	4-6 km	8,872	6,899	10,919	10,356	13,184	9,041	59,271
		R4	6-8 km	4,856	4,731	9,308	8,265	17,612	10,597	55,369
		R4	8-10km	8,334	7,230	9,508	12,308	15,570	22,136	75,086
		Subtotal		29,795	24,344	38,295	38,549	54,402	50,728	236,113
	Congonhas Total			64,287	45,863	75,648	71,254	81,228	82,825	421,105
Guarulhos	Aligned	R1	0-2 km	0	0	0	0	0	0	0
		R2	2-4 km	0	0	244	188	500	370	1,302
		R3	4-6 km	512	414	4,827	2,206	2,794	3,601	14,354
		R4	6-8 km	994	562	2,738	2,277	5,572	10,140	22,283
		R5	8-10km	380	1,282	2,291	2,702	4,073	9,538	20,266
		Subtotal		1,886	2,258	10,100	7,373	12,939	23,649	58,205
	Dis-Aligned	R1	0-2 km	0	112	512	0	0	0	624
		R2	2-4 km	0	0	68	198	0	0	266
		R3	4-6 km	0	0	0	0	29	1,002	1,031
		R4	6-8 km	0	239	1,648	819	722	889	4,317
		R5	8-10km	418	949	3,049	1,182	1,810	2,131	9,539
		Subtotal		418	1,300	5,277	2,199	2,561	4,022	15,777
	Guarulhos Total			2,304	3,558	15,377	9,572	15,500	27,671	73,982
Grand Total				66,591	49,421	91,025	80,826	96,728	110,496	495,087

Figure 6, in the sequence, shows a series of heat maps illustrating how the number of new residential units set for sale by real estate developers evolved along the several quasi-five-year periods, and how they geographically distribute between the surroundings of Congonhas and Guarulhos airports, considering the "bow-ties" aligned and dis-aligned with their respective runways within the ARM. These heat maps were developed weighting the number of total residential units' year by year, summed for the quasi-five-year periods, with a buffer rendering of 3 km from the densest points of the geo-referenced residential enterprises. They were all classified into five levels of densities, which limits have been arbitrarily defined as shown on the legend of Figure 6.

It is noteworthy that this data refers to real estate developers and does not include self-construction, neither in normal, urbanized urban plots by privateers, or self-construction of new shacks in slums. Formal real estate development concentrates on the central alignments of the runways of both airports (São Paulo's center is Northwest of Congonhas airport and Guarulhos center is west of Guarulhos airport).

It is also important to note that here are high population densities on the peripheral alignments of both airports' runways (Southeast of Congonhas and East of Guarulhos), indicating that these areas were densely populated in 2010, although they had nearly no commercial real estate development since 1985, indicating the presence of informal and eventually subnormal dwellings (slums).

Figure 6: Evolution of Heat Maps of New Residential Units (5-year Periods) Overlay to the ARM for São Paulo's Congonhas (Central) and Guarulhos (Non-Central) Airports



The population density within the 3.14 km^2 "*iso-areas*" show dense areas aligned with Congonhas' runways (Figure 5). There is a dense "*iso-area*" just 2-4 km northwest of the runway, which is due to vertical, multiple-stories buildings in "*Moema*" neighborhood, while in the south, the higher density reflects intense partitioning of plots into small areas for single- or multi-familiar sub-normal housing, often in self-constructed shacks in slums or shantytowns from 2 km to 6 km south of Congonhas airport. The dense "*iso-areas*" 6-10 km north of Congonhas coincide with vertical housing development in the expanded city center, surrounding "Paulista Avenue", which spreads towards east (into the "bow tie" dis-aligned with Congonhas' runways) in lower densities.

Guarulhos Airport neighborhood has low density within 2-4 km aligned with its runways because its site is significantly larger than Congonhas'. West of the runway, though, there is a high-density "*iso-area*" due to slums, north of Guarulhos' city center, where moderate densities were observed in 2010. East of the runway there are low to medium density "*iso-areas*" due to urban segmentation caused by the airport itself. The higher density "*iso-areas*" in the south (dis-aligned to the runways, 6-8 km, and 8-10 km radius) are due to a mix of slums and vertical urban development in east-northeast end of São Paulo – a clear urban expansion area (unrelated to the airports). North of Guarulhos airport site lays an environmentally protected area ("Serra da Cantareira" forested hills) not yet encroached by urban development – but threatened by urban expansion with subnormal housing of low-income families.

6. CONCLUSIONS

The use of the ARM suits the purposes of this study by allowing visualizing land use up to 10 km radius from the airports' centers. It is a clear means to comparing densities and new housing heat maps as aligned and dis-aligned to the airports' runways. An imaginary straight line from the runways allows considering fully aligned "*iso areas*" and moderately aligned ones, providing subsidies for air traffic controllers to develop Noise Abatement Departure Procedures (NADP) in optimized routes (although every route out of Congonhas airport flies over populated areas). It also contributes for urban planners to better regulate zoning in order to prevent increasing residential densities in noise-sensitive areas aligned with these large airports' runways.

However, evidence shows that an urban sprawl process very similar to that which surrounded São Paulo's older and more central Congonhas airport is being replicated at the vicinities of newer and more peripheral Guarulhos international airport.

Evidence supporting such finding is two-fold. First, the evolution of real estate formal development illustrated by consecutive quasi-five-years periods with heat maps, especially towards cities' centers alignments of both airports' runways (Figure 6). Second, from mapping population densities based on the 2010 Census indicating high population densities also at the opposite runway alignments towards the peripheral areas of São Paulo and Guarulhos Municipalities, where self-constructed and eventually subnormal urban development predominates (Figure 5).

On one hand, this obviously prevents both airports to expand, especially their runways capacities (Guarulhos airport master plan anticipated the construction of a 3rd runway, but since the turn of the century this is considered not feasible, as it would require the involuntary resettlement of no less than 5 thousand families). On the other hand, allowing continuous augmentation of population densities aligned with these airports runways tends to fuel more conflict, as the number of people affected by aircraft noise increases substantially. Thereby, such evidence indicates that the conflictual fate around Congonhas airport may well be replicated around Guarulhos international airport, putting additional challenges both for airport operators and for city planners at São Paulo and Guarulhos municipalities, eventually limiting the prospects of capacity expansion of the São Paulo Metropolitan Area airports capacity. Expanding the survey to newer-than-2013 data (not yet available) could reinforce this conclusion.

References

ANAC. (2019). *Regulamento Brasileiro da Avaliação Civil n° 161 (RBAC-161) - Proposta de Emenda.* Brasília: ANAC.

ASN (2022). Fonte: Aviation Safety Network: https://aviation-safety.net/database. Viewed May, 2022.

Beiguelman, G. (1996). *No ar: 60 anos do aeroporto de Congonhas.* São Paulo: Infraero.

Calder, S. (2003). *No frills: the thuth behind the low-cost revolution in the skies.* London: Virgin Books.

CEM. (2018). *Centro de Estudos da Metrópole*. http://web.fflch.usp/centrodametropole/716. Viewed August, 2018.

CONDEPHAAT. (1978). *Processo n° 20.519/78.* São Paulo: Secretaria da Cultura/CONDEPHAAT.

Davis, M. (2006). *Planet of Slums.* London: Verso.

Feldman, S. (2005). *Planejamento e zoneamento: São paulo, 1947-1972*. São paulo: Edusp/Fapesp.

Graham, S. & Marvin, S. (2001). *Splintering urbanism: networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition.* London: Routledge.

GRU-Airport. (*s.d.*). *História do Aeroporto de Guarulhos.* Guarulhos: GRU-Airport.

Harvey, D. (2012). *Rebel Cities: from the right to the city to the urban revolution.* London: Verso.

IBGE. (2010). *Censo 2010*. Fonte: IBGE: https://www2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm Viewed July, 2018.

IBGE. (2013). *Aglomerações Subnormais - Resultados preliminares do censo 2010.* RIo de Janeiro: IBGE.

IBGE. (2022). *São Paulo: panorama*. Fonte: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama. Viewed April, 2022.

Mello, L. B. (2006). *Aeroporto de Congonhas: terminal de passageiros, história da construção.* São Paulo: Prêmio Editorial.

Santos, R. R. (1985). *Aeroportos: do campo de aviação à área terminal.* São Paulo: Contar.

SEADE. (September de 2018). PIB Municipal e PIB regional. São Paulo, São Paulo, Brasil. Viewed September, 2018.

Silva, R. T. (1 de 2000). The connectivity of infrastructure networks and the urban space of São Paulo in the 1990s. *International Journal of Urban and Regional Research*, 24(1):139-164.

Werneck de Oliveira, L. H. (2018). Is planning compatible land use around large airports sufficient to avoid urban conflicts? Evidence from large airports in North America and Latin America. In: J. B. Camargo Jr. (Ed.), *17th SITRAER.* São Paulo: SBTA.

Werneck de Oliveira, L. H. (2019). The increasing distance of airports from city centers: an exploratory analysis of airprot replacement and multiple airport system's cases. In: L. Weigang (Ed.), *18th SITRAER.* Brasília: SBTA, UnB.

ECONOMIC AND POLITICAL INSTABILITY AFFECTING THE ATTRACTIVENESS OF SELECTED AIR TRAVEL DESTINATIONS CLOSE TO CONTINENTAL EUROPE FROM 2000 TO 2019

Luiz Henrique Werneck de Oliveira
Ph.D., Territory Planning and Management, M.Sc., Civil-Hydraulic Engineering, B.Sc. Sanitary Engineering, B.Sc. Social Sciences
UFABC-PGT; Zukunft Consulting

*** Corresponding author e-mail address**: luizwerneck64@gmail.com

PAPER ID: SIT216

ABSTRACT

Tourism by air travel is an important economic activity that generates and transfers wealth, improving the economics of specific air travel destinations. This article investigates how economic and political instability affected the attractiveness of tourism of European travelers to Mediterranean and Atlantic Islands *versus* Egyptian and Turkish coasts from 2000 to 2019 by computing yearly airport patronage of Spanish (Baleares and the Canaries) and Greek islands which face increasing competition from resorts on the shores of Egypt and Turkey. Yearly throughput of airports within these countries were computed: 3 airports at Baleares, 6 at the Canaries in Spain, 8 at the Greek Islands, 3 in Egypt (Red Sea and the Sinai) and 5 airports at Turkish by the Mediterranean and Aegean Seas along the period. Growth trends differ in stability and pace, with acceptable R^2 regression indexes on the 2000-2009, 2010-2019, and 2000-2019 periods. Poorer R^2 values were found when the bundle of airports faced economic instability and further poorer when subject to political instability, as it was the case of Egypt and Turkey within the 2010-2019 periods. All destinations were mildly affected by economic downturn after the 2008 global financial crisis but emerging tourism destination groups at Egypt's Red Sea and Sinai and Turkey's Mediterranean and Aegean coasts have suffered more dramatically from local political instability events in recent years. However, as the former has not fully recovered its growth trend falling further behind the European offshore destinations after a terrorist attack destroyed an aircraft leaving one of its resorts in 2015, the latter has quickly recovered as a popular tourism destination within short flights from central Europe. Hence, the evidence computed shows that political instability and terrorism outweighed the effects of economic downturn in these air travel destinations, although this may be reversible, as observed in Turkey.

Keywords: Air Travel, Tourism, Economic Instability, Political Instability, Passengers Movements.

1. INTRODUCTION

International tourism has a very strong relationship with air travel. It locally generates and geographically transfers wealth, improving specific places' economics through tourism industry subsectors such as accommodation, food and beverage, passenger transport, travel agencies and other related support services.

Local and regional economies boost from tourism activities. This implies transfer of expenditures from places of origin to places of destination of tourists as the choice of travelling on vacation is resource-dependent: upon limited resource availability one choses to travel rather than consume other goods or services (e.g., buy a new car, refurbish one's house). This happens in domestic travelling as well as on international ones, and the latter involves checks and balances of inbound and outbound expenditures.

It is important for many countries to receive tourists whose expenditures are on strong international currencies (e.g., Euros, United States Dollars). Countries with consolidated tourism destinations receive more foreign tourists than their population travel abroad. This is very important for countries with beach resorts which form economic clusters that may become wealthier regions within the rest of the country.

In this context, tourism destinations compete against each other (both locally and regionally *versus* internationally), and local or national crises events may drive tourists away to other destinations, resulting a vicious cycle for destinations being avoided by tourists and a virtuous cycle on selected destinations.

Air travel is the most frequent mode of transportation and access to many countries, either because of their geography (being land-locked, island-states etc.) but mostly because the ability of air travel to compress space by reducing travel time, thus leaving longer periods for the tourists at their destination of choice.

It is intuitive that tourism destinations depend on economic and social stability. One rarely chose to travel on vacation to places in unrest, with violent conflicts, such as civil war.

In moments of economic crisis, the choice of travelling for tourism vacations may be cancelled or postponed, either because the crisis is affecting the traveler and the country of origin, the country of destination or both. On the other hand, economic crisis can lead to social unrest and uprisings that by its turn will drive tourists away. Social uprisings may lead to political crisis and may involve instability events like coup attempts, protesting, riots, terrorism, and other forms of violence outbreaks. All of them are likely to diminish tourism activities in the countries or places where such events occur.

However intuitive the stability *versus* tourism relation may be, there is little if any metrics on specific destination clusters, regions, territories etc., as international data from United Nations World Tourism Organization (WTO) is generally aggregated by country, not opened by specific destination bundles within countries.

By selecting specific types of destinations within similar characteristics and travel time from a certain region, the evaluation of the effects of economic crisis and resulting social and political unrests may be extremely useful for determining better policies and planning of tourism by countries' and/or local authorities.

The objectives of this article are two-fold: on one hand it assesses the use of airports yearly passengers' throughput of selected bundles of airports on tourism destinations as a metric of consequence of economic and/or political instability events; on the other hand, it tries to compare the impact of economic instability with the impact of political instability in a sample formed by airports serving tourists' destinations outside but rather close in travel time flights from continental Europe.

Hence this article investigates how economic and political instability affected the attractiveness of tourism of European travelers to some Mediterranean and Atlantic Islands *versus* Egyptian and Turkish coasts from 2000 to 2019 by computing yearly airport patronage of Spanish (Baleares and the Canaries) and Greek islands which face increasing competition from resorts on the shores of Egypt and Turkey.

2. THE IMPORTANCE OF TOURISM AND AIR TRAVEL

Tourism and air travel are important economic sectors with very intense interface and common interests (Lyle, 2005). Air travel sector is regulated by the International Civil

Aviation Organization (ICAO) and organized by International Air Travel Association (IATA), while tourism is represented by United Nations World Tourism Organization (WTO) and by the World Tourism and Travel Council (WTTC).

Tourists are defined by the WTO as overnight visitors staying on another country from one night to one year. Visitors staying in a country not spending a night in it are defined as excursionists (same-day visitors, either in connection flights or in cruise ships). Visitors staying longer than one year may be considered immigrants or expatriates, depending on each countries' immigration policies (WTO, 2022).

Prior to the SARS-Cov-2 pandemic tourism was responsible for 10.4% of the world's Gross Domestic Product (GDP) with US$ 9.17 trillion, and generated 334 million jobs worldwide, corresponding to 10.6% of worldwide formal jobs. The pandemic reduced tourism activity in 50% worldwide: in 2020, 62 million tourism-related jobs were lost. The recovery in 2021 was modest but expected to rebound in 2022 and 2023 if the former employees decide to return to the vacant positions. Domestic tourism diminished less than international tourism (WTTC, 2021).

In many countries, most inbound tourists' arrivals are by the means of air travel rather than by land or water. Land-locked countries can rarely be accessed by water (exceptions are like the Peruvian-Bolivian border on the Titicaca Lake and river cruise ships like in the Donau River in central Europe). Land-locked countries well connected by rail lines and roads like Switzerland and Austria may be accessed by land, but island countries like Iceland and the Seychelles are generally accessed by air travel by their visitors. Countries accessible by land, water and air are predominantly accessed by air travel, thus air travel and international tourism show strong positive relationship (WTO, 2022).

The origins of tourism travel involved royal families and aristocracy members searching for healthy destinations. Along 18th and 19th centuries only a minority (higher clergy, judges, parliament members, higher military rank officers, university heads, protégé artists such writers and painters, as well as high income businessmen, bankers, and traders) had access to leisure travel and/or activities, heading a pyramid-like chart where less privileged bourgeois, artisans, and agricultural and manufacturing workers were set apart by a hermetic cultural barrier (Boyer, 2003).

Within time (especially after World War I and along 20th century), wealthier people became able to spend money travelling to the same exclusive destination that once received only members of royal families, changing the acceptance driver from aristocratic rank to the ability to afford services, breaking the strong cultural barrier that separated the bourgeois from the aristocracy. Symbols of exclusiveness were no longer reached only by royal families, rather the strata setting tourism destination examples became cinema and theatre artists, well succeeded writers, painters and sculptors of international reputation (Boyer, 2003).

Mass tourism had a strong relation with industrial revolution (Lefèbvre, 1991, p. 58) as "the perimeter of the Mediterranean [was transformed] into a leisure-oriented space for industrialized Europe", thus creating a "non-work" space for vacations as well as for convalescence, rest and retirement, in search of "ecological virtues such as an immediate access to sun and sea and a close juxtaposition of urban centres and temporary accommodation (hotels, villas etc.)". While tourism produces different kinds of space where wealthier people spend their money, it also contributes to the economy by creating jobs in accommodation, food and beverage, passenger transport, travel agencies and other related support services forming clusters of economic activities as a new, emerging economic sector (Boyer, 2003).

The chase for sun, light, sea, warm weather etc., can be summarized as a different gaze, put as a way of viewing (or framing) of a natural or anthropic scene or location through a particular social lens, following the definition of a desire to gaze upon what is different or unusual (Urry J. , 1996). In this sense, tourism includes both leisure and business travel. Simultaneously, there are no longer strict barriers put by most national borders to hamper the expansion of global capitalism or leisure travel: from the crisis of Nation-States a hegemonic domination of global capitalism raised within the context of globalization (Jessop, 2000). At the same time, global cities become origin and destination of international travel without the previously mandatory

intermediation of Nation-State (Purcell, 2007; Friedmann & Wolff, 1982).

Air travel is a means of physically moving people experiencing time compressing space (Knowles, 2006), thus "shrinking" the world (Allen & Hamnett, 1995). Aviation and airports replaced the role of transcontinental connection that up to 18th century belonged to ships and ports and in continental scale to railways (19th century) and roads (20th century). Airports and air travel became the new interface of global and local scales. Large cities became metropolises and their airports followed the logic of providing physical connections among city-regions (Cwerner, 2009; Addie, 2014).

The study of Global City Networks (GCN) is limited as border entry data by city and or region are hardly available on the same methodological basis of national data (WTO, 2022). Travel data differ from origin-destination when there is use of hubs within GCN networks (*e.g*., a traveler from Nashville, Tennessee who flies to New York to than to Paris and visit the Valle de La Loire has his or her international travel record from New York to Paris rather than from Nashville to, say, Amboise, at the Loire Valley, in France) (Derruder, Van Nuffel, & Witlox, F., 2009).

This broader redefinition of geography by technological travel paradigm has placed air travel as a key element of international travel as well as of global and regional connection – not to say national, in countries with continental dimensions (Urry J. , 2009).

For the WTO, the natural interdependence between aviation and tourism can be fostered by institutional arrangements capable of generating mutual and symbiotic benefits for both sectors, since most international tourists travel fly to their destinations (Lyle, 2005). But such symbiosis is not unlimited: analyzing the demand for leisure air travel in the United Kingdom, Graham (2000) identified limits on the ability and willingness to travel of package tour consumers (market supply maturity), as well as restrictions due to congestion and lack of capacity at airports and airspace control (saturation of supply). The author identified evidence of decreasing growth rates in the British international tourism market, with income commitment limits and demand elasticities between 1970 and 1998 – strictly speaking, still at the beginning of the Low Cost Carriers (LCC) raising importance in the British and European aviation markets (Calder, 2003).

Airports reconfigure geography as a means of bringing places closer to each other, becoming metastable structures where global capital connects new origins and destinations (Fuller & Harley, R., 2004). Airports also generate environmental and social impacts that transcend their physical limits, opposing diffuse economic benefits to the regions they serve (Button & Taylor, S., 2000; Brueckner, 2003; Florida, Mellande, & Holderson, 2015) to the negative externalities on neighboring communities (Schipper, Rietveld, & Nijkamp, 2001); (HCN, 1999), which contribute for the footprint of impacts of tourism (Sinclair, 1998).

By the times of Nation-State hegemony airports were national gateways; as the importance of Nation-States retracted towards the raising importance of city-regions, larger airports became hubs, and the others were their feeding spokes. With the intense growth of aviation over the past decades, simultaneously to the emergence of rise of LCC (Calder, 2003), the hub-and-spoke arrangements started to provide room for direct "tunnel" connections from several origins to destinations without using the hub (Graham & Marvin, 2001).

As put by Boyer (2003) after Lefèbvre (1991), tourism evolved and leisure travel destinations hosting visitors created clusters of specific types of new kinds of economic activities. Such activities derive from a setting or juxtaposition of places and landscapes, both natural (beaches, mountains, fields) and anthropic (ancient cultures' ruins, monumental areas, and historical heritage places) such as the Pyramids around the Cairo, the Blue Mosque in Istanbul, the Acropolis in Athens etc. These are "heritage tourism destinations" (connected to human geography), which mix business with tourism travel. The focus of this paper is non-heritage destinations, such as sea beaches with warm weather attracting European tourists (connected to environmental geography), where there is an undeniable dominance of leisure travelers – in this case, within a few hours' flights from central Europe instead of long-haul flights to places such as Bali, Tahiti, Maldives Seychelles etc. The purpose is to avoid the potential confusion of types of air travel within

aeromobilities, such as business travel and combined business and leisure travel that is generally attracted by larger, globalized and network-connected global cities (Friedmann & Wolff, 1982), leaving leisure travel for a more dedicated type of tourism where spaces become consumable commodities (Cater., 1995).

Despite the criticism on the lack of sustainability of air travel and on the local impact of tourism, the association of air travel and tourism is very important in economic terms (WTTC, 2021). It is intuitive that safety and security is a key factor for any tourism destination: tourists will rarely feel comfortable in places where unrests of any kind are ongoing. Leisure tourists are probably risk-adverse.

It is assumed that economic and political crises will hamper pure leisure and combined business-leisure travel more than business travel. By the same token, safety is intrinsic to air travel and security is a key factor for tourism, generating a virtuous circle for destinations labeled as safe as well as a vicious circle on those perceived as unsafe, reproducing the saying by Gunnar Myrdal: "nothing succeeds like success; nothing fails like failure" (Barber, 2008).

Besides safety and security on the tourist destination, safety of air travel on the travel to and from tourist destinations is of utmost importance. So, factors generating economic instability may (but not necessarily does) lead to political instability, and political instability may (but again not necessarily will) lead to violent unrests such as street riots and terrorism.

Chomsky (2002, p. 102) defines terrorism as "the calculated use of violence to reach political, religious or ideological objectives either by intimidation, coercion or by instilling fear". Geismar (1981) considers terrorism an alternative found by radicals either when the reigning political regime becomes unbearable or when ordinary means of acting politically become inoperative.

In cases in which economic instability led to political instability and then to violent civil unrest and even terrorism, it is envisioned that tourism destinations will suffer by diminishing attractiveness, temporarily or permanently. As most of tourism destination data is aggregated by countries (WTO, 2022); (WTTC, 2021), this paper identified a selection of destinies of travelers driven basically by leisure within few hours of air travel flight from central Europe apart from peripheral continental on the Mediterranean shores such as Algarve in Portugal, Southern Spain's Costa del Sol and Costa Brava, France's Côte D'Azur, Costa Esmeralda in Italy and the like.

3. METHODOLOGY

This paper selected tourism destinations that are (i) basically accessed by air travel; (ii) visited by tourists looking for environmental geography landscapes (beach resorts) rather than human geography (heritage places); (iii) within few hours' time flights from central Europe rather than long haul flights to more remote destinations.

The sample consists of bundles of airports serving specific destinations in Spain, Greece, Turkey and Egypt. The number of inbound tourists on a yearly basis arriving at these countries is not split from gross national totals. Hence, they mix the numbers of landscape and heritage tourism destinations such as Madrid and Barcelona, in Spain, Athens in Greece, Istanbul and Cappadocia in Turkey, and Cairo and the Nile in Egypt with the number of tourists visiting beach resorts in these countries, which receive direct flights from central Europe more often than from their countries' capitals.

Per capita Gross Domestic Product (GDP) were surveyed yearly from 2000 to 2019 for these four countries, both in absolute values as well as plotting the evolution trends along this period, benchmarking the year 2000 as a reference. Based on that, the effects of several events were evaluated on this data, such as the terrorist attacks to New York and Washington of September 11, 2001, the global financial crisis of 2008, and their aftermaths on these countries' economy in the following years. The relative growth of *per capita* GDP based on the smallest figure available were also computed to allow seeing the proportions among these countries in 2000, 2009 and 2019 (respectively beginning of the analytical period, its mid-point – right after the world financial crisis – and the last year of the analytical period).

Profiles of tourist access for 2010 and 2019 were identified considering the number of yearly visitors, the percentage of access by air

and on vacation (leisure), plus the percentage of tourism in these countries' GDP, in order to evaluate the dependency of their tourism sectors in their economies.

As a direct indicator of the number of tourists visiting these specific resort locations, the yearly throughput of airports within these countries were computed as follows:

- 3 airports at Baleares Islands (Ibiza, Palma-Mallorca, and Menorca) in Spain;
- 6 airports at the Spanish Canaries Islands (Fuerteventura, La Palma, Gran Canaria-Las Palmas, Lanzarote, Tenerife Sur-Reina Sofia and Tenerife-Los Rodeos);
- 8 at the Greek Islands (Heraklion-Nikos Kazantzakis, and Chania-Daskalogiannis, in Crete, Rhodes-Diagoras, Kos-Hyppocrates, Corfu-Ioannis Kapodistrias, Santorini-Thira, Zakinthos-Dionysius Solomos and Mykonos);
- 3 airports serving Egyptian shore resorts (Hurghada and Marsa Alam on the Red Sea and Sharm-El-Sheik at the Sinai); and
- 5 airports at Turkish by the Mediterranean (Antalya and Adana-Sakirpasa) and by the Aegean Sea (Dalaman, Milas-Bodrum, and Izmir-Adnan Menderes).

Continental Spanish airports such as Madrid, Barcelona and others were not included on the sample (as they are driven by business and heritage tourism), the same happening with Athens and Thessaloniki in Greece, Cairo in Egypt, and Istanbul and Ankara, in Turkey. Although cities like Izmir in Turkey and Heraklion in Greece are large and generate business and non-pure leisure travels, these are important tourism destinations, and thus they were included in the sample.

Regarding alternative Mediterranean Islands, Malta was not included on the sample because of its diversified economy with a large free port and fiscal benefits for businesses other than tourism, and Cyprus was not included due to its undefined configuration since the 1974 war which partially destroyed Nicosia airport – the Island has tourism resorts accessible through Lárnaca and Pafos airports on the Greek side, and the Ercan airport on the Turkish (unrecognized) side.

Passenger movement data was computed along time by the author based on AENA's yearly reports for Spain (www.aena.es), the Hellenic Civil Aviation Authority for Greece (www.aia.gr), Turkish Ministry of Transport and Infrastructure (www.dhmi.gov.tr), and Egyptian Holding Company for Airports and Air Navigation (www.ehcaan.com).

Yearly passenger movements of the 25 eligible airports were bundled into the 5 groups (Spain-Baleares, Spain-Canarias, Greek Islands, Turkey Shores and Egyptian Shores) and computed along the period from 2000 to 2019, avoiding the effects of the SARS-Cov-2 pandemic from 2020 onwards, but including both economic and political crises affecting these countries and regions. Apart from passengers x time plots, growth trends were analyzed prior to the 2008-2009 world financial crisis and after it, verifying R^2 regression indexes on the 2000-2009 and for the 2010-2019 periods, comparing the R^2 of linear, exponential and logarithm regression from dispersions in MS Excel®.

These trends were plotted and tabled to allow visual yet simple analysis to identify which specific instability events indeed affected the performance of these tourism destinations in terms of passengers' throughput as an indicator of tourism visitors.

4. RESULTS

The sample countries' economies suffered differently the effects of the aftermath of September 11, 2001, terrorist attacks, the 2008 global financial crisis, and other financial and economic crises afterwards. Yearly *per capita* GDP of these countries in current US$ are shown on Table 1 while Figure 1 shows the relative trend from the year 2000.

Spain's and Greece's economies did not suffer on the aftermath of the September 11, 2001, attacks in the United States, but Turkey's and Egypt's did, although both recovered momentarily (Turkey's in 3 years; Egypt's in 6-7 years).

The world financial crisis of 2008, on the other hand, affected Spanish and Greek economies severely and permanently, indicating that the pre-crisis growth was not sustainable. Overspending in the pre-crisis years punished their economies as inserted in the Euro zone, without the ability to devaluate their currency. Turkey suffered a reduction of its *per capita* GDP for 2 years, and then recovered its

economic growth trend until 2012, when its economy started diminishing the *per capita* GDP until reaching the same level of 2009 in 2019. Egypt, which has a lowest *per capita* economic output within the sample, kept growing its *per capita* income until 2015, experiencing a very sharp drop from 2016 to 2017, with slow recovery since then.

Table 1 *Per Capita* GDP Evolution of Spain, Greece, Turkey, and Egypt, 2000-2019, in Current US$

Year	Spain	Greece	Turkey	Egypt
2000	14.750	12.073	4.337	1.450
2001	15.369	12.549	3.143	1.378
2002	17.107	14.178	3.688	1.191
2003	21.511	18.518	4.760	1.102
2004	24.907	21.995	6.102	1.062
2005	26.429	22.560	7.456	1.186
2006	28.389	24.822	8.102	1.397
2007	32.591	28.864	9.792	1.667
2008	35.511	32.128	10.941	2.045
2009	32.170	29.829	9.103	2.331
2010	30.532	26.717	10.743	2.646
2011	31.678	25.484	11.421	2.792
2012	28.323	21.913	11.756	3.230
2013	29.068	21.788	12.615	3.263
2014	29.501	21.167	12.158	3.390
2015	25.742	18.084	11.006	3.563
2016	26.523	17.924	10.895	3.520
2017	28.170	18.582	10.590	2.444
2018	30.365	19.757	9.454	2.537
2019	29.554	19.134	9.122	3.019

Source: (The World Bank, 2022).

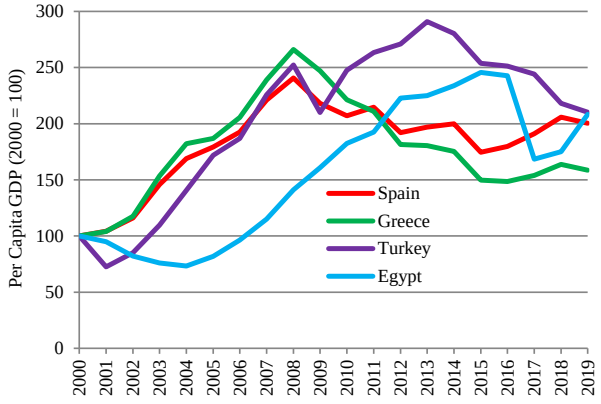


Figure 1 *Per Capita* GDP Evolution for Spain, Greece, Turkey, and Egypt, 2000-2019 (2000 = 100)
Source: based on (The World Bank, 2022).

It is interesting to observe that, in the year 2000, Turkey's *per capita* income was triple of that of Egypt, Greece's was 8 times larger, and Spain's was 10.17 times larger. Table 2 *Per Capita* GDP Ratio of Spain, Greece, Turkey in 2000, 2009 and 2019, related to Egypt in 2000 (= 1.00)shows such ratio also for 2009 and 2019. While Egypt ended up with a *per capita* GDP that was the double of that of its own in 2000 and Turkey experienced a somewhat similar performance, Greece and Spain reached their pike next to the world financial crisis and, although diminishing their indicators for 2019, they are still better off than Turkey and far better than Egypt.

Table 2 *Per Capita* GDP Ratio of Spain, Greece, Turkey in 2000, 2009 and 2019, related to Egypt in 2000 (= 1.00)

Year	Spain	Greece	Turkey	Egypt
2000	10.17	8.33	2.99	1.00
2009	22.19	20.57	6.28	1.61
2019	20.38	13.20	6.29	2.08

Spain's and Greece's economic downturn since the 2008 world financial crisis did not trigger bad enough political instability to worsen their ongoing years. Greece experienced riots and violent street protesting, but faced political renovation with further economic drawbacks, while Spain experienced increased unemployment particularly among youngsters, but these countries' institutions were able to keep their balance along the recent years of the study period. Turkey's economic instabilities were not enough to challenge its political condition, although there was an attempt of military *coup d'état* in 2016 (which was overthrown by the established regime). Egypt, on the other hand, experienced severe political instability from 2011 onwards due to the Arab Spring, when the former regime was driven out of power. Although Egypt was able to protect its *per capita* GDP for some more years, it is by far the poorer and most tourism-dependent country in the sample, and it experienced a severe economic downturn from 2016 to 2017, after a terrorist attack bombed an airplane flying from its Sinai's resort, killing all 224 people on board (ASN, 2022). Table 3 shows these countries' tourism profile in terms of total tourism arrivals (overnight visitors, in millions), how much of that, percentwise, is by air, how much of the total, also percentwise of the total, is on leisure vacation, and how much of these countries'

GDP for the years 2010 and 2019 was generated by tourism.

Table 3 Spain, Greece, Turkey, and Egypt Tourism Profiles, 2010 and 2019

Country	2010 WTO Profile				2019 WTO Profile			
	Total Arrivals	By Air (%)	Vacation (%)	% of GDP	Total Arrivals	By Air (%)	Vacation (%)	% of GDP
Spain	52.0 M	77.0	82.6	10.3	83.0 M	82.3	87.3	12.3
Greece	15.0 M	70.9	N.A.	4.6	32.0 M	66.1	N.A.	11.0
Turkey	31.5 M	70.0	71.9	3.4	50.5 M	77.0	75.7	5.6
Egypt	14.0 M	85.6	98.3	6.0	12.6 M	86.9	97.8	4.5

Source: (WTO, 2022). N.A. = Not Available.

Such data show that Spain is by far the country that receives more tourists, with a strong dependence of air travel and very concentrated on leisure vacation. Therefore, tourism increased its share of the GDP by two percent points of the total from 2010 to 2019. As its *per capita* GDP stayed stable from 2010 to 2019 (see Table 1 above), it is fair to say that tourism by air travel on leisure vacation gained economic importance in that period.

Greece's tourism industry practically doubled its economic impact from 2010 to 2019, both in terms of total arrivals and even further in terms of percentage of the GDP. Air travel access remains important, but land and sea access increased their shares of importance. Data on the importance of leisure vacation on this country's profile was not available (N.A.) on the WTO country's profile.

Turkey became a major tourism market by increasing nearly 20 million yearly tourists' arrivals from 2010 to 2019. Air travel gained importance upon land and sea access, while the proportion of non-leisure or non-vacationers among visitors (from 28.1% in 2010 down to 24.3% in 2019) and the relatively low portion of the GDP coming from tourism (despite its increase in the decade) shows a robust and more diversified economy.

Egypt, on the contrary, is the only country in the sample that diminished its yearly tourists' arrivals. It shows extreme dependence on air travel and on leisure travelers on vacation. Due to this sectorial downturn, the participation of tourism in the country's GDP diminished in 2019 as compared to 2010.

Figure 2 illustrates the evolution of passengers' yearly patronage of the five bundles of airports (Spain's Baleares and Canaries Islands; Egypt Sea resorts, Turkish Shores, and Greek Islands), with data from their national aviation and/or airport authorities compiled throughout time by the author.

As a direct, isolated effect of the 2008 world financial crisis, the passengers' throughput processed in the airports of Spain's Canaries Islands suffered more than that of the Baleares', taking 3 years to recover, both showing slow growth trends along the second half of the period of analysis. Contrary to the effect of the economic crisis upon Greece, the number of passengers on the airports of the Greek Islands was relatively flat along the first half of the period and grew slowly on the second half of the period, possibly growing slower than the major hub airports of the country, such as Athens and Thessaloniki (not shown on the plot).

The evolution of the passengers' throughput of Egyptian and Turkish airports of the sample was quite different.

In the case of Turkey, the growth trend was quite impressive along the period, and the impact of the attempt of *coup d'état* of 2016 was followed by a recovery that may not have been fast, but was certainly impressive, as 2 years later the number of passengers. As a result, within the sample, Turkish resorts' airports now respond for the lion's share of passengers, outnumbering the Spanish and Greek destinations (which were busier or alike in 2000). Turkish resort airports surpassed the 2 bundles of Spanish airports in 2009 and even with the political crisis of 2016, the resulting numbers recovered strongly in recent years, configuring these destinations as important players in this market.

The Egyptian case is a clearer example that political instability can hamper the growth and the success of tourism destination. First, the slow growth trend clearly ceased after the Arab Spring of 2011, with oscillations of the number

of passengers in these resort airports in the following years. On October 31, 2015, an Airbus A321 of a Russian operator leaving Sharm-El-Sheik was destroyed by the explosion of a bomb aboard, claiming 224 lives, crashing at the central Sinai (ASN, 2022).

This event was far more devastating in terms of driving air travelers away from Egyptian beach resorts in the following years, with the numbers slowing recovering to the lower than pre–Arab Spring levels within 3 years' time, when the world tourism market was struck by the SARS-Cov-2 pandemic.

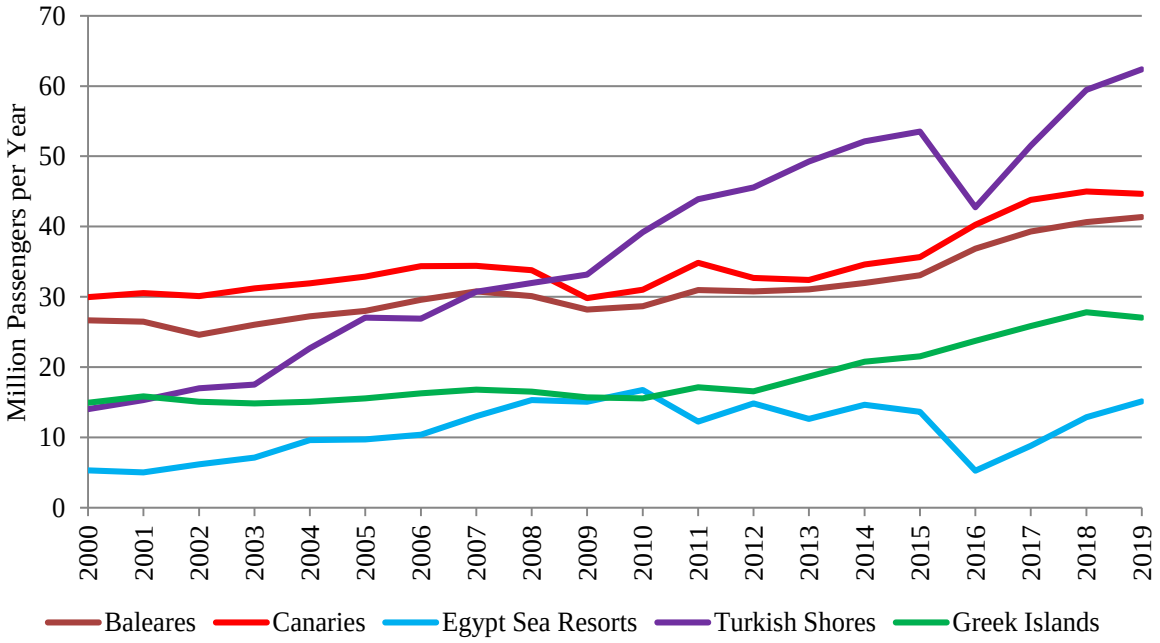


Figure 2 Yearly Passengers Throughput on the Sample Airports Bundles

Table 4 summarizes the R^2 of regression for curves of the bundles above, for 2000-2009, 2010-2019 and for the entire 2000-2019 period, highlighting in bold the best-fit values for stronger adjustment of the various trend curves.

Table 4 : R^2 of Passengers' Curves of the Airport Bundles, Best Fit Equation and Fit Quality

	Bundles	Exponential	Linear	Logarithm	Best fit Equation	Fit Quality
2000-2009	Baleares	0.5091	0.5911	0.5911	y = 0.4932x - 960.9 / y = 988.67ln(x) - 7489.2	Poor
	Canaries	0.2712	0.2782	0.2785	y = 643.49ln(x) - 4860.6	Very Poor
	Egypt Resorts	**0.9607**	0.9555	0.9554	**$y = 1E\text{-}116e^{0.1343x}$**	**Good**
	Turkish Shores	0.9447	0.9663	**0.9664**	**y = 4742.7ln(x) - 36036**	**Good**
	Greek Islands	0.4365	0.4362	0.4362	$y = 5E\text{-}08e^{0.0097x}$	Poor
2010-2019	**Baleares**	**0.9394**	0.9235	0.9232	**$y = 3E\text{-}36e^{0.0423x}$**	**Good**
	Canaries	**0.8780**	0.8601	0.8599	**$y = 2E\text{-}37e^{0.0438x}$**	**Acceptable**
	Egypt Resorts	0.1326	0.1191	0.1193	$y = 2E+32e^{0.036x}$	Very Poor
	Turkish Shores	0.6773	0.6714	0.6713	$y = 1E\text{-}33e^{0.0395x}$	Poor
	Greek Islands	**0.9638**	0.9650	0.9649	**$y = 1E\text{-}59e^{0.0689x}$**	**Good**
2000-2019	**Baleares**	**0.8531**	0.8218	0.8211	**$y = 2E\text{-}19e^{0.0233x}$**	**Acceptable**
	Canaries	0.6827	0.6533	0.6524	$y = 4E\text{-}15e^{0.0128x}$	Poor
	Egypt Resorts	0.2134	0.2616	0.2623	$y = 4E\text{-}30e^{0.0349x}$	Very Poor
	Turkish Shores	0.9057	0.9531	**0.9532**	**y = 5065.4ln(x) - 38489**	**Good**
	Greek Islands	**0.8184**	0.7954	0.7584	**$y = 2E\text{-}27e^{0.032x}$**	**Acceptable**

During the first half of the period study (2000-2009), the oscillation of yearly values of passengers on Spanish and Greek airports' bundles was intense, and only the bundles of Turkish and Egyptian airports yielded good regression values for exponential and logarithm trends.

On the second half of the period study (2010-2019), the regression values are acceptable for the bundle of airports of the Canary Islands and good for the Baleares and for the Greek Islands, but the effects of political instability on Turkey and mostly Egypt prevent any trend to be reasonably adjusted: the values show intense dispersion, leading to poor and very poor regressions.

Considering all the 20 years' period (2000-2019) the Baleares Greek Islands yielded acceptable values of R^2 for exponential growth trend, while the logarithm curve adjusted for the bundle of Turkish Shore airports was good. The overall adjustment for the curves of patronage of the Canaries Islands and the Egypt Resorts are poor and very poor, respectively – the former because of economic effects after the 2008 world financial crisis and the latter because of the political instabilities following the Arab Spring and then the October 2015 aircraft bombing at the Sinai.

5. CONCLUSIONS

The locales identified are all sea-front resorts within Mediterranean Islands of Greece and Spain and Atlantic Islands of the latter, as well as the Mediterranean e and Aegean Sea shores of Turkey and Red Sea and Sinai Peninsula for Egypt.

Instead of the number of inbound tourists, the passenger patronage of the airports serving these bundles of tourism destination was employed as metrics to investigate the effects of events of economic and social instability from 2000 to 2019 to determine whether they indeed affect the number of tourists in a temporary or permanent way, as well as to determine if the effects of political instability are stronger than those of economic instability.

All destinations were mildly or not at all affected by the economic downturn after the 2008 global financial crisis except for the Canaries Islands, which yielded poor overall regressions. On the other hand, emerging tourism destination groups at Egypt's Red Sea and Sinai and Turkey's Mediterranean and Aegean coasts have suffered more dramatically from local political instabilities in recent years.

However, as the former has not fully recovered its growth trend falling further behind the European off-shore destinations, the latter has quickly recovered as a popular tourism destination within 3-hours flight range from central Europe. Over the past decade, Turkish shores have become one of the most popular tourism destinations for central European air travelers, and although it suffered after the failed *coup d'état* of 2016, it quickly recovered the attractiveness for tourists in the following years.

Hence, the evidence computed shows that political instability and more specifically terrorism outweighed the effects of economic downturn in these air travel destinations, although this may be reversible, as observed in Turkey. Evidence from these bundles of airports of tourism destinations within a few hours flight from central Europe shows that a terrorist attack bombing of an aircraft had a stronger and longer lasting effect on passengers' choice than political instability, as well as that the outbreaks of political instabilities in Egypt and Turkey had a stronger effect than that of the world financial crisis of 2008 at Spanish and Greek off-shore tourism destinations.

References

Addie, J.-P. (2014). Flying high (in the competitive sky): concetualizing the role of airprots in global city-regions through 'aeroregionalism'. *Geoforum, 55*, pp. 87-99.

Allen, J., & Hamnett, C. (1995). Introduction. In: J. Allen, & C. Hamnett, *A shrinking world? Global uneveness and inequality* (pp. 1-10). Oxford: Oxford University Press.

ASN. (2022). *Aviation Safety Network*. Fonte: Aviation Safety Network: https://aviation-safety.net/database/

Barber, W. J. (2008). *Gunnar Myrdal: an intellectual biography.* London: Palgrave.

Boyer, M. (2003). *A história do turismo de massa.* Bauru (SP): EDUSC/EDUFBA.

Brueckner, J. K. (2003). Airline traffic and urban economic development. *Urban Studies, 40*(8), pp. 1455-1469.

Button, K., & Taylor, S. (2000). International air transportation and economic development. *Journal of Air Transport Management, 6*, pp. 209-222.

Calder, S. (2003). *No frilss: the truth behinf the low-cost revolution in the skies.* London: Virgin Books.

Cater., E. (1995). Consuming spaces: global tourism. In: J. Allen, & Hamnett, C.. Oxford: Oxford University Press.

Chomsky, N. (2002). *11 de setembro.* Rio de Janeiro: Berttrand Brasil.

Cwerner, S. (2009). Introducing Aeromobilities. In: S. Cwerner, S. Kesselring, & J. Urry, *Aeromobilities* (pp. 1-21). London: Routledge.

Derruder, B., Van Nuffel, N., & Witlox, F. (2009). Connecting the world: Analyzing global city networks through airline flows. In: S. Cwerner, Kesselring, S., & Urry, J., *Aeromobilities* (pp. 76-95). London: Routledge.

Florida, R., Mellander, C., & Holderson, T. (2015). Up in the air: the role of airports for regional economic development. *Annals of Reg. Science, 54*, pp. 197-214.

Friedmann, J., & Wolff, G. (1982). World city formation: an agenda for research and action. *International Journal of Urban and Regional Research, 6*(3), pp. 309-344.

Fuller, G., & Harley, R. (2004). *Aviopolis: a book about airports.* London: Black Dog.

Geismar, A. (1981). *L'engrenage terroriste.* Paris: Fayard.

Graham, A. (2000). Demand for leisure travel and limits to growth. *Journal of Air Transport Management, 6*(2), pp. 109-118.

Graham, S., & Marvin. (2001). *Splintering urbanism: networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition.* London: Routledge.

HCN - Health Council of he Netherlands (1999). *Health impact of large airports.* The Hague: HCN.

Jessop, B. (2000). The crisis of the national spatio-temporal fix and the tendencial ecological dominance of globalizing capitalism. *International Journal of Urban and Regional Planning, 24*(2), pp. 323-360.

Knowles, R. D. (2006). Transport shaping space: differential collapse in time-space. *Journal of Transport Geography, 14*(6), pp. 407-425.

Lefèbvre, H. (1991). *The production of space.* Malden; Oxford: Blackwell Publishing.

Lyle, C. (2005). Closer cooperation would bring mutual benefits to the aviation and tourism sectors. *ICAO Journal, 60*(2) pp. 5-8; 27-28.

Purcell, M. (2007). City-regions, neoliberal globalization and democracy: a research agenda. *International Journal of Urban and Regional Research, 31*(1), pp. 197-206.

Schipper, Y., Rietveld, & Nijkamp. (2001). Environmental externalities in air transport markets. *Journal of Air Transport Management, 7*(3), pp. 169-179.

Sinclair, M. T. (1998). Tourism and economic development: A survey. *The Journal of Development Studies, 34*(5), pp. 1-51.

The World Bank. (2022). *Macrotrends: Country GDP*. https://www.macrotrends.net/countries/ Viewed August, 2022.

Urry, J. (1996). *O Olhar do Turista.* São Paulo: Nobel/SESC.

Urry, J. (2009). Aeromobilities and the global. In: S. Cwerner, Kesselring, S., & Urry, J., *Aeromobilities* (pp. 25-38). London: Routledge.

WTO - World Tourism Organization. (2022). *Yearbook of Tourism Statistics, Data 2016-2020, 2022 Edition.* Madrid: WTO. doi:https://doi.org/10.18111/9789284423576

WTTC - World Tourism and Travel Council. (2021). *Global Economic Impact and Trends.* London: WTTC.

A COMPUTER MODEL FOR DETECTING AIRPORT LUGGAGE'S DIMENSIONS USING LOW-COST DEPTH SENSORS

Vitor de Almeida Silva, Marcos Paulino Roriz Junior*, Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira
Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás

*** Corresponding author e-mail address**: marcosroriz@ufg.br

PAPER ID: SIT149

ABSTRACT

A factor that impacts airlines' resources is the verification of luggage's dimensions during the boarding process. To check conformity, companies usually rely on a human operator. To mitigate this issue, companies are investing in automatic self bag drop systems. This process introduces new technological challenges, since, in this scenario, the verification of the conformity of the luggage dimensions is delegated to the passenger, which can lead to errors. In addition, current solutions use specific computing devices, such as laser scanners, that are expressive in size and cost, which may require interventions in the airport infrastructure. In this sense, this work proposes a model to measure luggage through a low-cost depth sensor as an alternative to obtain and verify its dimension. To do so, we developed an algorithm that obtains a 3D point cloud of the luggage surface through a Microsoft Kinect V2 sensor. After that, we generate the minimum polygon that cover these points, a process called convex hull. By doing so, we are able to obtain the luggage's dimensions. To test our approach, we implemented our model in MATLAB and created a real-world prototype. The results indicate that the mean absolute error is 1.33cm, 1.90cm, and 0.52 cm for the width, length, and depth, respectively, which indicates that this technology has the potential to become an alternative technology to detect the luggage's dimensions.

Keywords: self bag drop, luggage dimensions, internet of things, computer vision.

1. INTRODUCTION

From 2004 to early 2020, the number of people using air transport reached 4.723 billion (Statista, 2021). In this scenario, the boarding time of passengers increased significantly. For instance, Ren et al. (2020) study indicate an increase from 22 to 40 minutes in boarding time for 200 passengers in 1990 and 2009 respectively. In addition, it is known that the boarding process is one of the most time-consuming factors at airports (Gao et al., 2018). These delays result in losses for passengers and companies (Qingji et al., 2018).

Within the boarding process, checking the dimensions of luggages is one of the factors that consume substantial time (Ronzani & Correia, 2015; Negri & Borille, 2017). Another factor is the congestion formed in the aisle between the seats. One of the reasons for this comes from the delay in storing luggage by passengers in the aircraft top compartments, an action that is influenced by their dimensions, quantity, and material (Ren et al., 2020).

To address this issue, airlines have invested in automated solutions, which are part of the technological advances provided by Industry 4.0 (Göçmen, 2021).

Among the solutions, the implementation of self-service terminals to speed up the boarding process stands out (Colby, 2019; Ren et al., 2020). This procedure requires technologies that allow passengers to check in their own luggage (self bag drop). This logic can be applied at the entrance, in the waiting area, or along the airport (Alsyouf et al., 2018). It optimizes services and improves time savings. However, the process of verifying the luggage's dimension falls to the passenger, which can generate errors due to the format and position of the luggage (Colby, 2019; Ren et al., 2020).

To aid the passenger, airlines have explored the use of computer vision equipment as a way to detect the luggage size (Anderson, 2019; Göçmen, 2021). The most common technology applied are based on laser sensors, which are capable of obtaining information from luggage in the form of point clouds (Gao & Liang, 2021). These points represent where the sensor interacted with the luggage in an R^3 space.

From this point cloud, it is possible to provide an accurate measurement of the luggage's dimension (Chan et al., 2018). However, these equipments can have significant costs. Furthermore, in addition to the software, they commonly require physical instrumentation and modification of the infrastructure for their installation, which increases the difficulty in deploying or moving it to other parts of the airport (Gao et al., 2018).

Parallel to that, alternative and low-cost sensing technologies have emerged as a way to analyze an object's size (Kuan et al., 2019). For instance, the Microsoft Kinect, a depth sensor developed initially for video games, has encountered applications in several other areas, including airports (Zennaro et al., 2015; Anderson, 2019). This device has been widely adopted due to its feature and significantly low price (around 200 dollars) (Chan et al., 2018).

However, there is a lack of study that analyzes the usage and limitations of this technology for measuring luggages. Hence, given this gap, in addition to the inflexibility of existing technologies, and their expressive prices, this paper proposes a model for detecting the luggage size using low-cost depth sensors. To do so, the method employs the Microsoft Kinect depth sensor and algorithms for analyzing the point clouds. To evaluate our method, we programmed the approach in MATLAB and built a real-world prototype. Our results indicate that our model is able to detect the luggage's dimension with a mean absolute error of 1.33cm, 1.90cm, and 0.52 cm for the width, length, and depth. This result indicates that the model has the potential to be used in airports.

The rest of this paper is structured as follows. First, Section 2 presents the fundamental concepts that underlie this work. Then, Section 3 presents and discusses the method, while Section 4 presents the experiment used to evaluate our approach. Finally, Section 5 states the conclusion and future work associated with the limitations of the proposed method.

2. FUNDAMENTAL CONCEPTS

To exemplify the challenges in obtaining the luggage's dimension and verifying its conformity, we review the boarding process and how current technology approaches work.

2.1. BOARDING PROCESS

The boarding process analyzed was based primarily on the rules of the Brazillian National Civil Aviation Agency (ANAC, 2022), but can be customized by airlines. We also considered the rules for individual airlines, such as Azul (2022) and Gol (2022).

Passengers' luggages can be classified into carry-on, checked, and special luggage. Carry-on luggage are those that the passenger carry to the aircraft. According to ANAC, the standard limits for these type of luggage is 55 cm, 35 cm, and 25 cm for length, width, and depth, respectively. For maximum weight, the limit is 10 kg.

On the other hand, checked luggages must be dispatched, usually with the airline staff at the check-in desk or in a self bag drop machine. According to ANAC, the standard limits for checked luggage are 55 cm, 80 cm, and 28 cm, for length, width, and depth, respectively. And for the weight, the limit is 23kg. In addition to these issues, wheels, handles and any accessories attached to the luggage are also accounted in the measurement.

Finally, special luggages are those that do not fit into previous categories. For example, a sport equipment or a musical instrument usually needs to be dispatched as special luggage. Since their shape varies significantly, they are usually handled manually by airlines staff. As such, we will not address them in this work.

2.2. METHODS TO EXTRACT OBJECT DIMENSIONS

This is the main body of the article. Use 1 to 4 sections (e.g., bibliographic review, methodology, results, conclusions) This chapter is an example of the various chapters that the authors can use to report their respective studies, including the study methodology, the analysis and the final results.

The first review result indicated a total of 167 works. After a careful analysis, we found 14 papers that focus on how to obtain object dimensions. Of these studies, only 3 were trying to detect the airport luggage dimensions. The others acted in otherd domains. Regarding the technology, we found out that 7 works used the Microsoft Kinect, while 4 used laser scanners, and 3 used binocular vision. We highlight that none of the works that tried to analyze the luggage dimension used the Microsoft Kinect.

Regardless of the type of the technology used to scan the objects, the works are generally based on computer vision techniques. According to Bhowmik & Appiah (2018), computer vision is the process of acquiring, analyzing, and processing video and images to make decisions.

In computer vision, an object's dimensions is usually computed through a point cloud. These data points represent the object's contact points with the sensor in an 3D space, as illustrated in Figure 1 (a) and (b). Subsequently, a point cloud is processed to reduce noise. After that, we can compute the object's dimension by discovering a three-dimensional polygon that covers the cloud, see Figure 1 (c).

This entire process commonly employs the convex hull algorithm, since it obtains the smallest polygon that wraps the captured object points (Ding et al., 2018; Gao et al., 2018). To exemplify this process, consider the following example. Given a set of points A, the convex hull seeks to find border points, generating a subset B, which in turn represents the smallest polygon that covers all points of A. This polygon can be used to reproduce the surface of objects or collect information from its dimensions (Ding et al., 2018). Figure 1 (d) illustrates an example of 3D convex polygons.

Concerning the pre-processing step, we highlight that it is possible to apply several techniques, such as subsampling, clustering, segmentation, and filtering. Subsampling reduces the density of points, reducing the

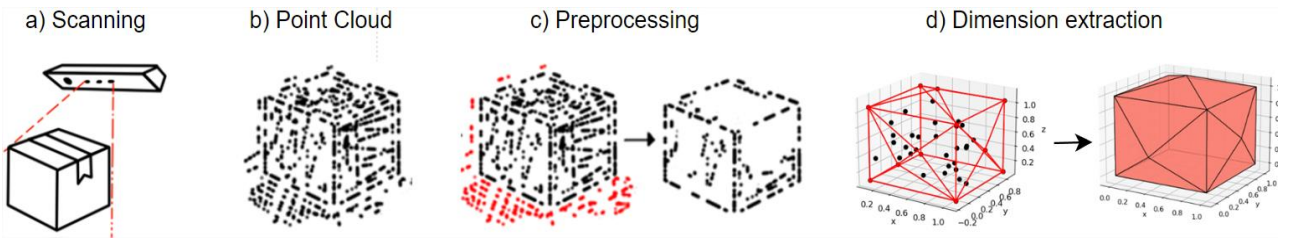


Figure 1 Process of obtaining dimensions using a depth sensor (Microsoft Kinect) and convex hull

computational expense needed to analyze the object (Ruchay et al., 2018). Clustering, on the other hand, removes outliers that can hinder the reconstruction process, since border points can significantly change the polygon that delimits the 3D object. Further, segmentation aims to remove outlier points that will not be used in processing (Limwattanapibool and Arch-int, 2017).

As for technologies for capturing point clouds, we highlight the usage of mobile laser scanners, binocular sensors, and depth sensors, such as Microsoft Kinect.

Laser scanners can be applied in self-service services. Such equipment is composed of a treadmill, an internal environment with lasers, and a processing center (Qingji et al., 2018). The customer places their luggage on the treadmill and the scanner, through the use of sensors, returns the dimension values (Gao et al., 2018).

Airline and airport usually employs this type of technoclogy to enable the self bag drop stations. However, laser scanners usually have a signifcant cost, ranging from USD 10,000.00 to USD 111,000.00 for a single sensor. As an airline can have multiple self bag drop stations, this can be costly. Furthermore, in addition to the software, they commonly require physical instrumentation and modification of the infrastructure for their installation, which can make it difficult or impossible to move them for other parts of the airport (Gao et al., 2018).

Another option is binocular vision systems. The technique is inspired by human vision, consisting of capturing two or more images of the same object at relatively different angles by cameras. From this, it is possible to form a 3D object and identify its dimensions (Qingji et al., 2018). The main disadvantage of this method is that the position of the luggage directly influences the result, sometimes making the method impractical (Gao & Yang, 2013).

As an alternative to the technologies mentioned, researchers have explored the use of low-cost depth sensors, such as Microsoft Kinect. This device is capable of efficiently returning point clouds with high precision (Chan et al., 2018). Another attraction is its portability, ease of installation, as well as its price, around USD 200 dollars (Ruchay et al., 2018). Figure 2 illustrates the Microsoft Kinect version 2 components.

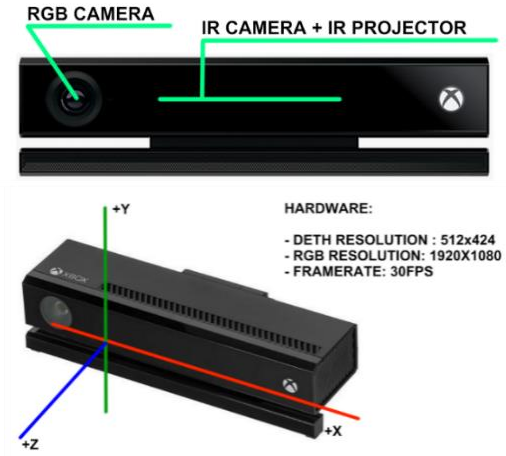


Figure 2 Microsoft Kinect V2

3. METHODOLOGY

The proposed model is based on two major phases: sampling strategy and dimension extraction. This section presents the concepts of each phase. Further, it describes the real-world prototype we built to implement the model

As stated previously, we decided to use the Microsoft Kinect v2 depth sensor due to its low cost and successful usage in other scenarios (Kuan et al., 2019). For implementing the algorithm, we used the MATLAB programming language due to its community support and compatibility with the sensing device. Finally, we used an Arduino board to control parts of the hardware device.

3.1. SENSING STRATEGY

The first step was to choose the sensing strategy. Precisely, how are we going to scan (sample) the luggage. Considering this task, we highlight two options: static sensing, and mobile sensing.

Static sensing consists of positioning the sensor at a fixed point and collecting the entire point cloud of the object in a single scan. This approach was used in works such as Gao & Yang (2013) and Qingji, Chuanbo & Qijun (2018), but without the use of Kinect. The resulting data sample can collect the point cloud in great detail. However, as the sizes of luggage can vary, it does not cover all cases, such as bags larger than the active area.

Moving on to mobile sensing, unlike the static mode, this approach does not scan the object in a single pass. In this case, the system sense a slice region, also known as Region Of Interest (ROI). The ROI is a segmentation that constrains the set of points in a region, as illustrated by the red slice in Figure 3. By using a sampling step and frequency, the object point cloud can be rebuilt.

The sensor is positioned at a fixed point, and the object is moved through its active region (ROI). Therefore, it is necessary to carry out a more extensive treatment consisting of collecting N samples of the object and concatenating them all in real-time to form the complete point cloud. Equation (1) shows the calculation, where p_i is the new sample taken and P_f is the resulting point cloud. The flowchart illustrated in Figure 6 represents this approach.

$$P_f = \bigcup_{i=0}^{n} p_i \quad (1)$$

The Kinect was positioned at 90° in relation to the luggage. This position reduces the number of occluded points, increasing the level of detail collected, such as handles and wheels. To fix the Microsoft Kinect, we built a support structure. The sensing device was placed at the top, in a glass support from a distance of 1 meter from the base.

A static sensor can be costly, as such, we decided to employ a mobile sensing strategy. Our

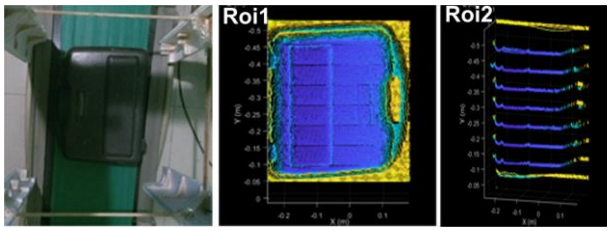


Figure 4. A luggage's point cloud. Roi with different sampling rate

approach uses the following steps (illustrated in Figure 7). First we choose the input parameters: the sampling rate (at which rate the point cloud will be captured), and the region of interest (location that will be sampled). After choosing the initial parameters, we check if there is an object between the treadmill and the sensor. If positive, we trigger the capture phase.

In this phase, we capture the entire point cloud of the luggage. To avoid handling angled data points, we only keep the part of the point cloud that is located directly below the Kinect sensor (the ROI). For instance, consider Figure 4. A lower sampling frequency, such as 1 cm, means that every 1 cm the sensor will capture a point cloud and keep the points in the middle. When joining these points, we get the entire point cloud without distortion with a 1 cm precision. Notice the gap produced when using a different frequency, 5 cm. The holes represent the lack data of caused by the delay between each sample.

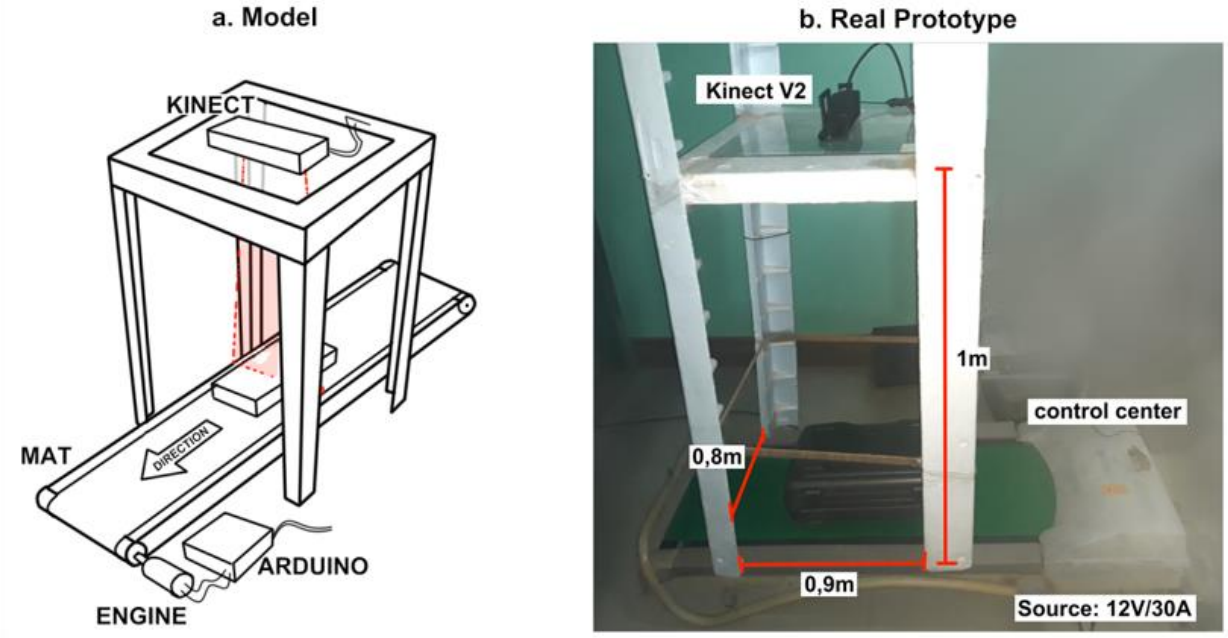


Figure 3. (a) System Model (b) System Implementation

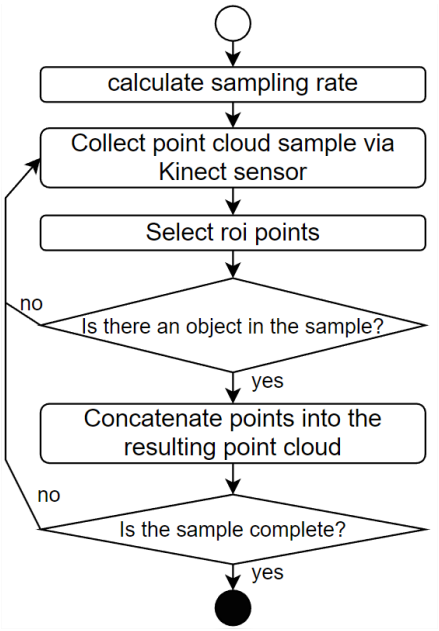


Figure 6 mobile sampling flowchart

Finally, after capturing the points we join them together and return the luggage's point cloud.

3.2. PROTOTYPE HARDWARE

Several electronic components were used to build the entire system. Precisely, we used a DC motor and an H bridge module to control the treadmill. We also employed an Arduino to enable user input. Furthermore, we reused an existing treadmill to build our structure. The structure aims to support both types of luggages: carry-on and checked luggage.

The modeling and simulation of the control center circuit were done in Proteus, a system designed to build and analyzes circuits. In the end, the physical circuit was placed in a box for protection. The developed code allows controlling the treadmill through buttons with the following options:

- Control of the direction of rotation, clockwise or counterclockwise;
- Increase treadmill speed.
- Reduce treadmill speed;
- Emergency button that stops the treadmill.

3.3. DIMENSION EXTRACTION ALGORITHM

According to the data from the systematic review, the most used algorithms for extracting object dimensions are the convex hull and least squares. The least squares method approximates the shape of the point cloud to a parallelepiped, which provides a measurement that is similar to what is done in airport practice. For instance, some airport uses an empty box template to verify the luggage's conformity. Altough simple, the challenge of this methods lies in the position, quantity, and deformation of the luggage.

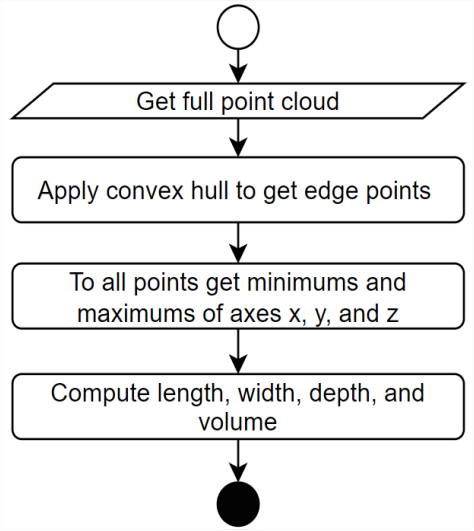


Figure 7 Algorithm used to extract luggage's dimension (AABB + Convex hull)

We implemented a simplified method that uses an axes-aligned minimal box (AABB) and the convex hull. This method returns the volume, and dimensions faithful to the format and within the measurements of a parallelepiped. We assume that the luggage has a cuboid shape. After that, we aligns the minimum and maximum axis to compute each dimension length. Figure 7 indicates the steps used by our algorithm in a flowchart.

The flowchart in Figure 7 shows that after computing the wrapping polygon we extract its boundary by analyzing the minimum and maximum points at each axis (x, y, and z). Using this data, we align them, and compute the luggage's dimension by projecting these limits in a parallelepiped. Equation 2, 3, 4, and 5 shows this computation. Here, L is the length, W is the width, and D is the depth, while h is the sensor height value which is a known constant.

$$L = (Y_{max} - Y_{min}) * 100 \quad (2)$$

$$W = (X_{max} - X_{min}) * 100 \quad (3)$$

$$D = (h - Z_{min}) * 100 \quad (4)$$

$$Volume = (C * L * P) / 100^3 \quad (5)$$

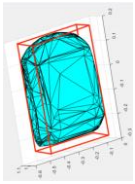
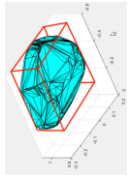
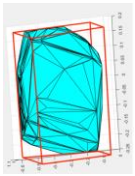
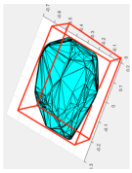
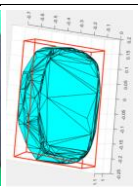
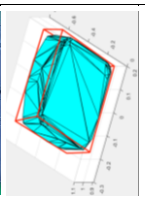
4. RESULTS AND DISCUSSIONS

To validate the prototype, we conduct tests with different luggages and bags. Table 1 shows the results obtained for the measurements, as well as the root-mean-square error (RMSE) returned for width, length, and depth. The mean absolute error (MAE) was also included to obtain insights into the dimensions individually. For each luggage, we executed 10 tests. The values presented in our approach are the average between the ones obtained in these tests.

We compare our result to the ground-truth. As such, each item is listed in terms of its width, length, and depth for the ground-truth (R), while our values are marked with (K). The N column represents the identifier code of each luggage.

From the analysis of Table 1, it is possible to see that for the L1 luggage, positioned horizontally, an RMSE of 0.30 cm was obtained. The L2 backpack, on the other hand, obtained an RMSE of 1.24 cm. Thus, it is possible to notice that there are errors with larger and smaller values. This is influenced, in addition to the sampling and position of the bag, by points slightly shifted due to reflection from the sensor when colliding with the bag's surface.

Table 1 Comparison between real-world measurements and the ones obtained by our approach

N	*Luggage*	*Convex hull and AABB*	*Real (R)*				*Our approach (K)*				*RMSE*
			Width	*Length*	*Depth*	*Volume*	*Width*	*Length*	*Depth*	*Volume*	
L1			42.50	50	17.80	0.037	42.58	50.24	17.35	0.0371	0.30
L2			42.10	55.23	18.50	0.043	42.60	56.98	19.65	0.0476	1.24
L3			42.50	50	17.80	0.037	42.96	52.04	17.21	0.0384	1.25
L4			42.10	55.23	18.50	0.043	43.64	50.04	18.29	0.040	3.13
L5			37.30	51.80	20.10	0.038	38.97	52.88	19.76	0,040	1.16
L6			41.00	58.01	22.00	0.052	44.71	59.14	21,65	0.057	2.25
	MAE						1.33	1.90	0.52	0.0027	

Another fact that corroborates the errors is the soft material of the L2 backpack. When handled, soft materials can be deformed, changing its dimensions. As we conducted multiple tests, the L2 luggage was repositioned several times, which can possibly explain the slightly different results.

The L3 and L4 tests were performed with the bags rotated diagonally. The errors returned were 1.25 cm and 3.13 cm respectively. In comparison with the results obtained in L1 and L2, there was an increase. A possible explanation is that the error is due to the projection done in AABB. Another issue is the difficulty in joining the point cloud caused by a rotated object.

Tests for L5 and L6 returned RMSE of 1.16 cm and 2.25 cm, respectively. The largest absolute error of these measurements occurred for the length values, 1.12 cm. By comparing the results of L5 and L6 with L1, it is possible to notice that the error increases according to the luggage size. A possible solution is to increase the sampling step and use extra filtering methods.

As for the time spent per measurement, the system uses an average of 0.14 s/cm. This means that, for example, given a suitcase with a length of 80 cm (the largest measure according to ANAC for dispatch luggage), the system would spend 11.8 seconds. Since the measurement time directly influences the check-in, it is interesting to make improvements to the system to reduce this time, such as reducing the time required to handle each sample and increase the treadmill speed.

Analyzing all tests, the mean absolute error was 1.33 cm for width, 1.90 cm for length and 0.52 cm for depth, totaling an average absolute error of 1.25 cm.

5. CONCLUSIONS

The present work proposed a model for detecting airport luggage dimensions using a depth sensor. Therefore, a systematic review was carried out, which found that the leading technologies used in the market are laser scanners, binocular vision, and depth sensors. The limitations found were the position, quantity, and shape of the luggage.

So, a prototype was built. The test results shown in session 4 indicate that the system was able to obtain the point cloud and calculate the dimensions of the luggage with an overall MAE of 1.25 cm. The average time expend for measurement is 0.14 s/cm. This indicates that the system needs improvements in time consuming. These results demonstrate that there is potential for using this low-cost alternative model in managing airline boarding operations and investments. By reducing measurement errors, it is possible to optimize the use of space on the aircraft and alleviate passenger frustrations.

In next stages of this research, is intended to deepen the tests regarding other positions and the amount of luggage by measurements, as well as explore the impact of handles, wheels, and labels on the results. It is also intended to explore obtaining the weight of the luggage.

References

Alsyouf, I., Kumar, U., Al-Ashi, L., & Al-Hammadi, M. (2018). Improving luggage flow in the luggage handling system at a UAE-based airline using lean Six Sigma tools. Quality Engineering, 30(3), 432–452.

ANAC. (2022). Passageiros. Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Available at: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/passageiros. Accessed on 19/10/2022.

Anderson, K. (2019). Singapore Changi Airport caught using Microsoft Kinect sensors. Onmsft.com. Available at: https://www.onmsft.com/news/singapore-changi-airport-caught-using-microsoft-kinect-sensors. Accessed on 19/10/2022.

Azul. (2022). Bagagem Despachada. Azul. https://www.voeazul.com.br/para-sua-viagem/informacoes-para-viajar/bagagem-despachada

Bhowmik, D., & Appiah, K. (2018). Embedded Vision Systems: A Review of the Literature. Applied Reconfigurable Computing. Architectures, Tools, and Applications, 204–216.

Bourque, P., & Fairley, R. (2015). Guide to the Software Engineering Body of Knowledge SWEBOK ® A Project of the IEEE Computer Society.

Chan, T., Lichti, D., Jahraus, A., Esfandiari, H., Lahamy, H., Steward, J., & Glanzer, M. (2018). An Egg Volume Measurement System Based on the Microsoft Kinect. Sensors, 18(8), 2454.

Colby, M. (2019). Self-service bag drops and the challenges of speeding up airport luggage

check-in. Available at: https://www.stantec.com/en/ideas/self-service-bag-drops-and-the-challenges-of-speeding-up-airport-luggage-check-in. Accessed on: 19/10/2022.

Ding, S., Nie, X., Qiao, H., & Zhang, B. (2018). A Fast Algorithm of Convex Hull Vertices Selection for Online Classification. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 29(4), 792–806.

Gao, Q. J., & Yang, L. (2013). Luggage Specification Detection Based on the Binocular Vision. Applied Mechanics and Materials, 278-280, 861–865.

Gao, Q., & Liang, P. (2021). Airline Luggage Appearance Transportability Detection Based on A Novel Dataset and Sequential Hierarchical Sampling CNN Model. IEEE Access, 9, 41833–41843.

Gao, Q., Yin, D., Luo, Q., & Liu, J. (2018). Minimum elastic bounding box algorithm for dimension detection of 3D objects: a case of airline luggage measurement. IET Image Processing, 12(8), 1313–1321.

Göçmen, E. (2021). Smart Airport: Evaluation of Performance Standards and Technologies for a Smart Logistics Zone. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2675(7), 480–490.

Gol. (2022). Bagagem | GOL Linhas Aéreas. Available at: https://www.voegol.com.br/informacoes/bagagem. Accessed on: 19/10/2022.

Kosacka-Olejnik, M., & Pitakaso, R. (2019). Industry 4.0: state of the art and research implications. Logforum, 15(4), 478–485.

Kuan, Y. W., Ee, N. O., & Wei, L. S. (2019). Comparative Study of Intel R200, Kinect v2, and Primesense RGB-D Sensors Performance Outdoors. IEEE Sensors Journal, 19(19), 8741–8750.

Limwattanapibool, O., & Arch-int, S. (2017). Determination of the appropriate parameters for K-means clustering using selection of region clusters based on density DBSCAN (SRCD-DBSCAN). Expert Systems, 34(3)

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and meta-analyses: the PRISMA Statement. BMJ, 339.

Negri, N., & Borille, G. (2017). Avaliação da influência de novas tecnologias em terminais de passageiros aeroportuários sob a ótica dos passageiros. Anais do XXXI Congresso em Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET.

Qingji, G., Chuanbo, P., & Qijun, L. (2018). Method on 3D Reconstruction of Airline Luggage Based on Active Laser Projection of Improved Encoding. 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 39.

Ren, X., Zhou, X., & Xu, X. (2020). A new model of luggage storage time while boarding an airplane: An experimental test. Journal of Air Transport Management, 84, 101761.

Ronzani, G. M., & Correia, A. R. (2015). Impact of demand and airport characteristics on luggage claim. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 168(2), 150–160.

Ruchay, A. N., Dorofeev, K. A., & Kolpakov, V. I. (2018). Fusion of information from multiple Kinect sensors for 3D object reconstruction. Computer Optics, 42(5), 898–903.

Statista. (2021, October 27). Airline industry - passenger traffic worldwide 2019 | Statistic. Statista. Available at: https://www.statista.com/statistics/564717/airline-industry-passenger-traffic-globally/. Accessed on: 19/10/2022.

Zennaro, S., Munaro, M., Milani, S., Zanuttigh, P., Bernardi, A., Ghidoni, S., & Menegatti, E. (2015). Performance evaluation of the 1st and 2nd generation Kinect for multimedia applications. 2015 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), 1–6.

IMPACT OF DISRUPTIVE SCENARIOS IN PASSENGER PROCESSING AT INTERNATIONAL AIRPORT TERMINALS: A SIMULATIVE STUDY

Giovanni Bauder [a] , Idoaldo Lima *[,a] , Giovanna Ronzani [b] , Johannes Reichmuth [a]
[a] RWTH Aachen University, [b] Aeronautics Institute of Technology

*** Corresponding author e-mail address**: idoaldolima@gmail.com

PAPER ID: SIT202

ABSTRACT

Fast growing passenger traffic, technology push and security concerns are some of the main challenges in the context of international travel nowadays. Investigating such disruptive scenarios is not only relevant but necessary to handle potential issues that may arise. In this work, our main goal is thus the investigation of the effects of disruptive scenarios in passenger processing systems at international airport terminals in a simulative environment. First, we developed base simulation models in AnyLogic to measure waiting times at both security checkpoints and passport control stations for varying sizes of airport and used flight and share data from different European airports, as well as sensitivity, visualization, and analytical approaches, to verify and validate the models. Then, adapting the simulation models, and corresponding relevant inputs and parameters, we implemented various scenarios of disruptive events, including both non-intrusive technological procedure and system failure at security check, as well as system failure at automated kiosks for passport control. We carried out numerous simulations runs, varying passenger flows and number of processing stations. At a same arrival rate, we found that less than a half of the processing stations are needed for security screening when using technologies like corridors instead of typical gates. In case of a partial system failure, for example, larger sized airports are associated with lower impacts in terms of waiting times. If more personnel are not made available in such an occurrence, however, passenger throughput is expected to drop to a third of its normal operations levels. At emigration, automated kiosks enhance service quality and require less infrastructure and personnel, even during system failures. This comparison between typical operations and disruptive scenarios are particularly important, given that it evidences the impact of new equipment, procedures, and concepts, and enable informed decision making under such circumstances.

Keywords: Disruption, Passenger Processing, Airport Terminal, Simulation.

1. INTRODUCTION

Airports are crucial infrastructures, responsible for transporting and connecting people and goods all around the world. The air transportation industry has developed significantly along the past decades, not only in terms of passenger volume, but also regarding technological innovations in airports. (TRB, 2010) While passenger's traffic almost tripled over the two decades before the COVID-19 pandemic (The World Bank, 2020), concerns about security, efficiency, as well as economy also increased significantly. Some reasons for these growing challenges are terrorist attacks, accidents, competition, and changing business models.

IATA (2022) forecasts passenger volume to continue to grow after the pandemic, recovering the traffic level of 2019 in 2024. Solutions aiming to avoid physical contact and to improve passenger flow, such as biometrics and self-service stations, should become more present in airport terminals. (Bakker, 2015) According to Khan & Efthymiou (2021), such measures tend to enhance passenger's satisfaction and to reduce their stress levels. Therefore, it is important that not only the infrastructure of both terminal and airside facilities is prepared for future changes, but also the passenger's experience must be considered while designing and operating an airport.

Critical facilities are, in this sense, e.g. security and border control. It is commonly where bottlenecks (i.e. waiting queues longer than acceptable) occur for departing or transfer passengers, due to insufficient number of equipment, peak of passenger flows, or inefficient operations. (Alodhaibi et al., 2016) These process stations represent main stress factors for passengers, not only because of waiting in queues, but particularly issues like devesting, invasive screenings, manual checks, and possible denial of entrance. If not reasonably dimensioned and operated, these process station can lead to long waiting times, less perceived safety, as well as decrease of future travel intentions. (Alards-Tomalin et al., 2014)

At the same time, when disruptions take place, terminal procedures must be adapted, generating modified passenger flows, which are difficult to predict but should ideally still provide good operational performance. Technologies like automated passport controls and non-intrusive security checks aim to solve these issues while keeping or even growing passenger throughput. Still, terminal clearances, troubles in IT-Systems, as well as strikes are the most common disruptive events in Germany, for instance. (Metzner, 2020)

Properly understanding the behavior of these passenger processing systems is therefore essential for adequate design and operation of airport terminals, especially under disruption. In this work, we thus aimed to investigate the effects of disruptive scenarios in passenger processing systems at international airport terminals in a simulative environment. Due to their relevance for the processing of passengers at airport terminals, we focus our analyses in security and border control, for departing passengers, and explore these steps under different circumstances in varying set ups of simulation models.

2. THEORETICAL FRAMEWORK

IATA (2014) describes passenger terminals as a series of interconnected subsystems. For a departing passenger, these subsystems include essentially: arrival, check-in and bag drop, security screening, border control (when applicable), and boarding.

During the security screening stage, all passenger and carry-on luggage go through x-ray screening and, in some cases, also through a secondary screening check. This process aims to ensure that no hazardous items enter departure lounges and aircrafts. At this stage public landside and secured airside areas are physically separated. (De Graeff, 2020)

The border control (in the case of departing or some transferring passengers, also called emigration) stage includes either automated kiosks and common counters for passport control. Government agents perform the passport and border control, in order to prevent that non-legally authorized passengers enter the airside area and are able to depart. For this reason, border control is only conducted for passengers with international destinations. (De Graeff, 2020)

Like for all other processes at the terminal, one of the most relevant parameters that drives design and operations of passenger processing stations at airport terminals is performance. Lemer (1992) describes performance as relations between passenger movements and comfort, convenience, as well as costs and ambiance factors. Passengers' experience is thus directly related to the time spent waiting in queues. (Manataki & Zografos, 2009) Airport terminals are planned to accommodate capacity to serve the peak hour passenger volumes on a given busy day and performance at security screening and emigration tend to be driven by departure peaks. (IATA, 2014)

Innovations in areas such as screening technologies, data analytics, automation, and robotics are thus catalysts for change in future airport environments. According to Nowacki and Paszukow (2018) security issues are particularly relevant in this case, where a uniform deployment of technology across the aviation sector is crucial, though associated with less capability to react against novel threat cases. Solutions in this direction are, e.g.: pre-screening, e.g. TSA PreCheck program in the USA (TSA, 2022); non-invasive security checks, e.g. scanning corridors proposed by EUROCONTROL (2017); smart borders, e.g. EasyPASS procedure in the EU (Nowacki & Paszukow, 2018); or biometrics, e.g. iris recognition for border control in some European airports (CSES, 2011).

According to Metzner (2020), however, airport operations are daily exposed to a range of disruptive events. These unexpected events negatively influence the performance of processing stations. In a high-technological scenario, problems such as power outage and equipment failure are particularly of interest. System unavailability in essential equipment and operational procedures result mostly in economic and image issues, thereby causing disruptions for travelers and airport employees. (Romero, 2020) With a tendency of airports being increasingly more dependent on IT-systems, attacks can target planes, airlines, or passengers, and can result in limitations at airport operations, economic consequences, as well as passengers' dissatisfaction. (Prevost, 2021)

In sum, the Level of Service (LoS) of passenger processing stations at airport terminals is directly related to waiting times in these stations and disruptive events have a great impact on their performance.

3. METHODS

Based on our objective, we first developed an initial discrete event simulation model in AnyLogic™ to measure waiting times at both security checkpoints and passport control stations for varying sizes of airport and used flight and share data from different European airports, as well as sensitivity, visualization, and analytical approaches, to verify and validate the models. Then, adapting the simulation models, and corresponding relevant input parameters, we implemented various scenarios of disruptive events, including both non-intrusive technological procedure and system failure at security check, as well as system failure at automated kiosks for passport control. We carried out numerous simulations runs, varying passenger flows and number of processing stations.

In this work, forecasts were not considered, as passenger activities (i.e. arrival rates) were predetermined. Only the flows and processes for departing passengers were analyzed and we did not include transfer passengers. For the analysis of emigration procedures, we considered the airport to be inside the Schengen area, which can be adapted for other regions around the world. The output results regarding IATA's Level of Service (LoS) are only related to the criterion maximal waiting time.

The simulation models were built assuming: empty systems at the beginning; two-hour simulation period of peak traffic for departure passengers; 10 simulation runs for each parameter variation's combination of each scenario (Schwienhorst, 2020); single-lined first-in-first-out waiting queues with infinite capacity and measurement points right before and after each queue.

In terms of inputs, the parameters varied either according to the modeled scenario (processing times) or inside the scenario itself

(arrival rates, number of processing stations). Shares of passengers owning EU-passports also varied in scenarios of emigration. We assumed triangular distributions for processing times, due to the little data available and to ensure a certain degree of randomness. For these distributions we used the values set up by Qualmann (2019), an average of processing times of terminal facilities according to diverse authors and EUROCONTROL (2006).

We use fix arrival rates, i.e. the number of individuals (departing passengers) entering the system in a period of time, in the simulation. This method was also used by Schwienhorst (2020) and consists in a parameter that represents departure passenger flows of an airport on a specific point on time. Therefore, it is possible to apply the simulation results for each point of time which corresponds to a specific arrival rate of an airport. Starting at 100 passengers per hour (PAX/h) in all simulated scenarios, this value was increased by 200 PAX/h till reaching a sub-optimum level of service at the maximal number of processing stations. Arrival rates were also randomly seeded, with different arrival patterns, producing more realistic simulations.

The number or processing stations was increased gradually till reaching a maximum, which was assumed as the number of facilities in the Frankfurt International Airport (FRA), as one of the largest airports in Europe regarding passenger traffic. For security controls, this represents 32 lines and equipment, whereas for emigration procedures, 16 passport control counters and automated kiosks. (Qualmann, 2019)

As a baseline scenario, in which verification and validation were carried out, the parameter for Cologne/Bonn airport (CGN) are assumed, as an average European point-to-point airport in the Schengen zone. This means, an arrival rate of 1500 PAX/h, 12 security controls and 4 passport controls. For border control scenarios, an 80% share of EU-passport-owning passengers was assumed, and the arrival rates were reduced to 500 PAX/h, which corresponds to 1/3 of international flights taking place in average in European airports. (Qualmann, 2019; Schwienhorst, 2020).

A range of verification and validation tests was carried out to confirm that the simulation model makes sense logically and can represent real systems. For one, a general sensitivity analysis was conducted in order to verify the behavior of outputs while varying parameters in each scenario. We reduced and increased the number of processing stations, arrival rates, and waiting times, one at a time, while maintaining the other two parameters constant. Another verification method was model visualization, by checking input parameters and their quantitatively correct processing with a tolerance of 10%.

Analytical approach by IATA ADRM's (2014) was also used to check the required number of processing stations for the given number of passengers arriving the facility in a specific period and a given LoS (maximal waiting time).

4. SCENARIOS AND RESULTS

A total of five scenarios were modeled and simulated in this work. Scenarios 1, 2, and 3 focus on passenger security screening procedures, whereas Scenarios 4 and 5 regard to the analysis of emigration procedures.

4.1. Scenario 1: Typical Operations at Security Check

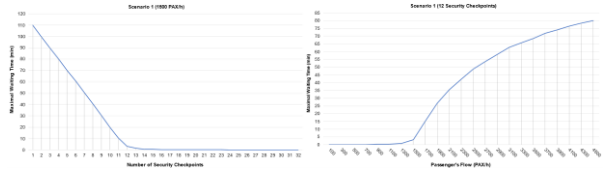
This scenario represents standard security control procedures of European airports. This means, state-of-the-art equipment is used to screen departing passengers and hand-baggage, such as Walk-Through Metal Detectors and X-ray machines, respectively. When the alarm is triggered or a suspicious illegal item is detected, a manual check must be conducted by a security officer. When the system is already saturated and there are more passengers arriving for security checks than being processed, a single-lined waiting queue arises before the screening equipment, and passengers are sequentially allowed to proceed in the moment that a screening equipment becomes available. Table 1 summarizes the input parameters for this scenario.

Table 1 Input parameters of Scenario 2

Security_1: typical security screening procedure	
Delay time [s]	triangular (20, 27, 40)
Capacity	1 - 32 (baseline: 12)
alarmSecurity_1: alarm not triggered at security check	
Probability	0.9
manualCheck_1: manual check (when alarm triggered)	
Delay time [s]	triangular (60, 120, 180)
Capacity	1 - 32 (baseline: 12)

We found that airports with an infrastructure of 32 security screening lanes can handle an arrival rate of 4300 PAX/h with still optimum LoS-standards. Until the arrival rate of 1500 PAX/h, it was not possible to constantly achieve optimum LoS-standards, what means the lowest the number of processing stations, the largest the sensibility of waiting times. Therefore, small airports should be conservative while designing security control areas, since equipment or procedure failures cause significant impacts in waiting times. The largest the number of security screening lines, the less the impact of single failures.

The average flow of arriving passengers passing through a single security screening line providing optimum LoS-standards calculated was approximately 130 PAX/h for each screening equipment. Figure 1 illustrates these results graphically.



(a) (b)

Figure 1 Scenario 1 - Max. waiting time per (a) number of security controls and (b) PAX flow at security controls

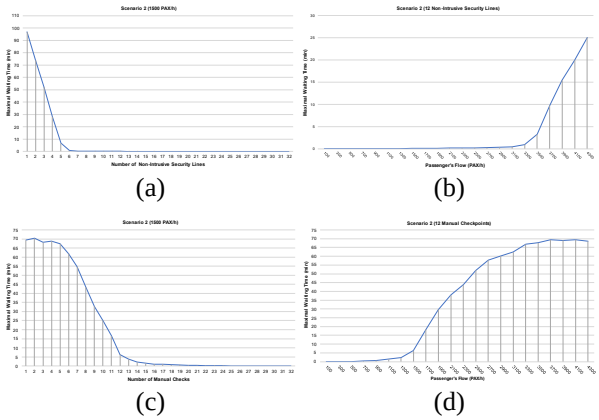
4.2. Scenario 2: Technological Security Check

This scenario represents the security control being executed by non-intrusive screening measures. The system modeled was based on EUROCONTROL (2006) description for scanning corridors. Passengers have their screening procedures accomplished while walking through the terminal towards the boarding area. Automated gates are allocated in the end of the scanning process, and permit or deny the passenger to continue to the next facility, depending on the result of the screening. If the access is rejected, a manual check must be carried by security officers, which closely follow the procedures at the automated gates. Table 2 summarizes the input parameters for this scenario.

Table 2 Input parameters of Scenario 2

Security_2: automated gates after scanning corridors	
Delay time[s]	triangular (8, 10, 20)
Capacity	1 - 32 (baseline: 12)
alarmSecurity_2: alarm not triggered at security check	
Probability	0.75
manualCheck_2: manual check (when alarm triggered)	
Delay time [s]	triangular (60, 120, 180)
Capacity	1 - 32 (baseline: 12)

For the automated gates, it was not possible to achieve a sequence of optimum waiting times during the simulations of the baseline scenario. This means, there is a high sensibility of ideal number of processing stations over the whole range of arrival rates. On the other hand, the manual checks achieved stability of optimum waiting times after 1500 PAX/h, meaning that there is a greater sensibility only for small arrival rates.



(a) (b)

(c) (d)

Figure 2 Scenario 2 - Max. waiting time per (a) number of automated gates, (b) PAX flow at automated gates, (c) number of manual checks, and (d) PAX flow at manual checks

The average flow of arriving passengers passing through a single automated gate

providing optimum LoS-standards calculated was approximately 300 PAX/h for each screening equipment. For manual check, this value was approximately 125 PAX/h for each security officer. As the values of average passenger flows in this still theoretical scenario result in a proportion of 2,4, a suggestion is to consider two to three extra officers for each automated gate, ensuring that security controls and manual checks operate at optimum LoS-standards. Figure 2 illustrates these results graphically.

4.3. Scenario 3: System Outage at Security Check

This scenario also represents a standard security control of European countries, however with the disruptive event of e.g. a power outage. This means, the whole scanning equipment is out of operation, and all screening procedures must be carried out through manual checks. It represents a situation of system unavailability, as well as obligatory manual checks for all departing passengers caused by imminent risks or threats. Table 3 summarizes the input parameters for this scenario.

Table 3 Input parameters of Scenario 3

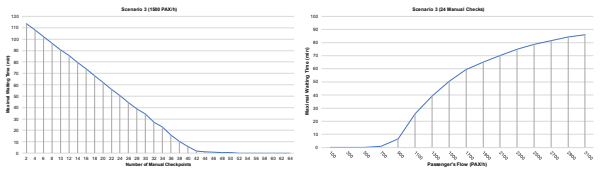
manualCheck_3: manual check (always)	
Delay time [s]	triangular (30, 90, 180)
Capacity (double of Scenarios 1 and 2)	2 - 64 (baseline: 24)

Before the arrival rate of 1300 PAX/h, it was not possible to constantly achieve optimum LoS-standards, what means the lowest the number of processing stations, the largest the sensitivity of waiting times. After 1300 PAX/h, optimum values of waiting times were achieved, meaning that there is a stabilization of system's behavior.

The average flow of arriving passengers passing through a single manual check providing optimum LoS-standards calculated was approximately 38 PAX/h for each security officer.

As complete failures cases in the security control system are rare, the outcomes were also compared to more flexible LoS-standards, representing a broader tolerance of waiting times for departing passengers. The second LoS-standard analyzed had the minimum and maximum values of 10 and 30 minutes, respectively. Before the arrival rate of 500 PAX/h, it was not possible to constantly achieve optimum LoS-standards, what means the lowest the number of processing stations, the largest the sensibility of waiting times. After 500 PAX/h, optimum values of waiting times were achieved, meaning that there is a stabilization of system's behavior.

The average flow of arriving passengers passing through a single manual check providing optimum LoS-standards calculated was approximately 45 PAX/h for each security officer. Figure 3 illustrates these results graphically.



(a) (b)

Figure 3 Scenario 3 - Max. waiting time per (a) number of manual checks and (b) PAX flow at manual checks

4.4. Scenario 4: Typical Operations at Passport Control

This scenario represents standard emigration facilities in airports inside the European Union. After security checked, passengers of international flights proceed to the passport control, which can be conducted by automated kiosks (for passengers with EU-passports) or by counters with government officers (for other passengers). The processing times of both stations are different, since automated kiosks are normally much faster due to rapid biometric identification. One officer was allocated at the automated kiosks, with the objective of supporting EU-passengers with difficulties.

Besides arrival rates and number of processing stations, a variation of EU-passport shares was also included into the system, in order to model different categories of airports regarding nationality of passengers. The maximal waiting time outputs of this scenario were two, one for the queues at automated kiosks, and one for the counters. Table 4

summarizes the input parameters for this scenario.

For the automated passport controls, as well as for the passport control counters, it was not possible to achieve a sequence of optimum waiting times during the simulations of the baseline scenario. This means, there is a high sensibility of ideal number of processing stations over the whole range of arrival rates. The only model where a stabilized behavior of waiting times was achieved was for the passport control counters at 50% EU-passport shares, from 1700 PAX/h on.

The average flow of arriving passengers passing through a single automated kiosk providing optimum LoS-standards calculated was approximately 250 PAX/h for each equipment.

The average flow of arriving passengers passing through a single passport control counter providing optimum LoS-standards calculated was approximately 100 PAX/h for each equipment.

Table 4 Input parameters of Scenario 4

sharesNonEUPass: proportion of non-EU passports	
Probability	0.8 or 0.5 (baseline: 0.8)
PassNonEU_4: passport control non-EU (counters)	
Delay time [s]	triangular (20, 30, 60)
Capacity	1 - 12 (baseline: 4)
PassEU_4: passport control EU (automated)	
Delay time [s]	triangular (8, 12, 20)
Capacity	1 - 12 (baseline: 4)
Alarm_4: failure of EU-passenger identification	
Probability	0.95
ManPassEU_4: manual check (failure EU identification)	
Delay time [s]	triangular (8, 12, 20)
Capacity	1

A proportion between 0,8 and one passport control counter for each automated kiosk should be considered to ensure optimum LoS-standards for 80% EU-passport shares. On the other hand, when 50% of the departing passengers are EU-passport holders, 2 to 3 passport control counters for each automated kiosk must be planned. Figure 4 illustrates these results graphically.

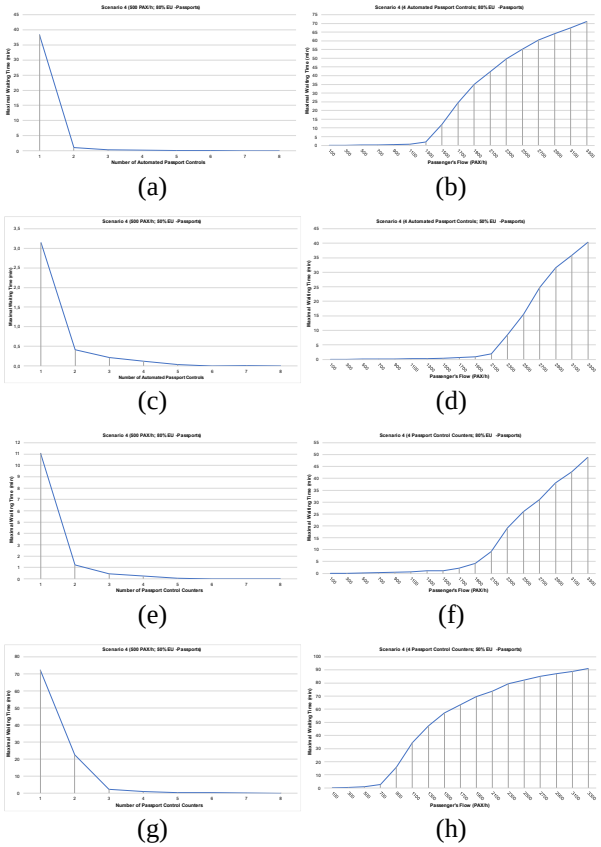


Figure 4 Scenario 4 - Max. waiting time per (a) automated kiosks (80% EU-passports), (b) PAX flow at automated kiosks (80% EU-pass), (c) automated kiosks (50% EU-passports), (d) PAX flow at automated kiosks (50% EU-pass), (e) passport counters (80% EU-passports), (f) PAX flow at pass. counters (80% EU-pass), (g) passport counters (50% EU-passports), and (h) PAX flow at pass. counters (50% EU-pass)

Scenario 5: Only Counters at Passport Control

This scenario can represent two different situations; the first one is a failure at automated kiosks, which obligates also passengers owning EU-passports to have manual emigration controls at counters, together with non-EU passengers. The second possible situation is the simulation of airport emigration procedures in regions where there is no technology being used yet for automated recognition of passengers' identity.

This means, all passengers of international flights pass through the same type of emigration procedure, therefore must wait in same queues, if needed. An important point is that "domestic" passports still constitute more agile process times even when checked by

personnel, due to more standardized procedures.

Also, in this scenario different shares of passengers owning EU-passports were simulated, in order to analyze the influence of regionality on waiting times for emigration procedures. Table 5 summarizes the input parameters for this scenario.

Table 5 Input parameters of Scenario 5

sharesNonEUPass: proportion of non-EU passports	
Probability	0.8 or 0.5 or 0.2 (baseline: 0.8)
PassEU_5: passport control non-EU (counters)	
Delay time [s]	if EU passenger: triangular (8, 10, 20) if non-EU passenger: triangular (20, 30, 60)
Capacity	1 - 12 (baseline: 4)

For the passport control counters, it was not possible to achieve a sequence of optimum waiting times during the simulations of the baseline scenario for the three different EU-passport shares. However, this time it does not mean that there is a high sensibility of ideal number of processing stations over the whole range of arrival rates. This behavior is explained by optimum values of arrival rates for the respective number of passport counters being between the values simulated.

The average flows of arriving passengers passing through a single passport control counter providing optimum LoS-standards calculated were approximately 220 PAX/h, 150 PAX/h, and 120 PAX/h for each counter for 80%, 50%, and 20% EU-passport shares, respectively. With this "rule-of-thumb", passport control systems of airport terminals could be dimensioned and provide efficient operations. Figure 5 illustrates these results graphically.

5. DISCUSSION

We have found that maintaining a fix arrival rate and varying the number of processing stations, the optimum number of processing stations represent a point of change for the maximal waiting times' pattern. When the number of processing stations is maintained, on the other hand, LoS-standards represent a division point for systems' behavior. When both parameters are simultaneously varied, similar graphical patterns are achieved in each scenario, however with different values and inclinations.

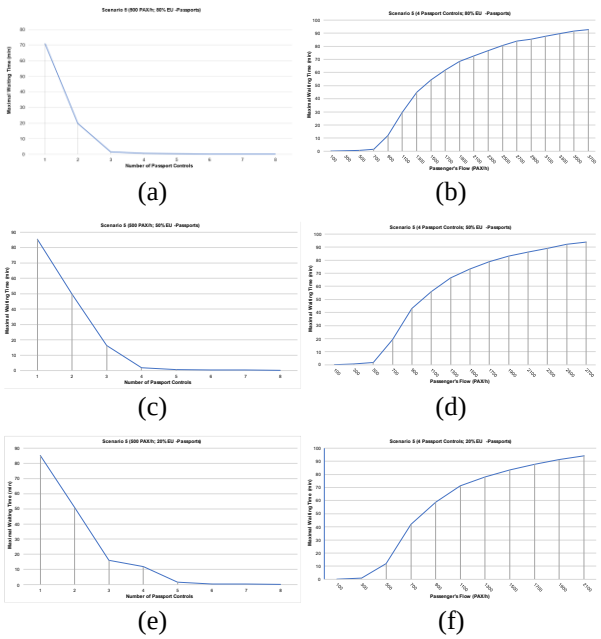


Figure 5 Scenario 5 - Max. waiting time per (a) passport counters (80% EU-passports), (b) PAX flow at pass counters (80% EU-pass), (c) passport counters (50% EU-passports), (d) PAX flow at pass counters (50% EU-pass), (e) passport counters (20% EU-passports), and (f) PAX flow at pass counters (20% EU-pass)

Analyzing the whole range of simulation results we can observe that the optimum number of processing stations for each scenario and parameters' combination follow linear patterns. When arrival rates are too low or too high in a simulation scenario, however, graphics become more difficult to analyze and to derive conclusions. This was the case in some graphics of Scenarios 4 and 5, where zones could not be clearly identified.

Some of the simulated scenarios had results stabilized in optimum LoS-standards when an arrival rate was reached. In other words, the larger the airport, the less the influence at the passengers' flow when there is an equipment failure, for example. The scenarios which did not reach a stabilization of optimum waiting times can be justified by the respective arrival rates being of a value between the ones simulated.

The main differences between Scenarios 1 and 2 are the agility and the non-intrusiveness at security screening procedures of passengers that do not must pass through

manual checks. At a same arrival rate, less than a half of the processing stations are needed when using the technology of automated gates after being scanned by screening corridors instead of typical security control facilities. Automated gates become more efficient the higher the passenger throughput.

Implementing the technology of scanning corridors would represent an expressive transformation of current security control areas regarding airport terminal's architecture. However, the required number of screening equipment to optimally attend passenger flows would not be dramatically changed, since manual checks still must take place at conventional screening equipment even in Scenario 2.

For the design of security control areas, the decisive procedure for Scenario 1 was the security screening, which resulted in bottlenecks when passenger throughputs exceeded optimum values. On the other hand, Scenario 2 presented bottlenecks at manual check procedures, caused by a much larger share of departing passengers having to pass through such manual checks due to higher equipment sensitivity. One suggestion for Scenario 2 is to tighten LoS-standards for automated gates to 1-5 minutes, since the implementation of new technologies should also improve passenger experience regarding waiting times. This could be achieved by slightly increasing the number of automated gates, which would theoretically not result in too much additional space and costs issues.

Regarding Scenario 3, the decrease of operational performance in case of a complete system outage was not as large as expected. Comparing with typical operations (Scenario 1), using the same infrastructure with two instead of one officer carrying out manual controls in each security lane, there is a passenger throughput loss. However, if it is not possible to double the personnel in this case of disruption, the maximal arrival rates still providing satisfactory waiting times decrease significantly, representing about a third of the original passenger throughputs for both LoS-standards considered.

Regarding the simulations of passport controls, it was observed that shares of EU-passports represent an influencing factor for the outcomes. The higher the proportion of international passengers (without EU-passports), the larger the number of passport control counters needed, and therefore also the more the personnel required. This happens due to the longer processing times of passengers without EU-passports, which must pass through a more laborious passport control.

It was also confirmed that automated kiosks enhance service quality at emigration procedures, by comparing Scenarios 4 and 5 outcomes. The suggested number of processing stations, however, remains almost the same when comparing both Scenarios. However, LoS-standards of Scenario 4 are more restricted than Scenario 5, since optimum LoS-standards of automated kiosks can only be achieved when maximal waiting times are between one and 5 minutes, meaning that European passengers have more agile procedures. Nevertheless, it is also important to notice that, automated kiosks only require one officer for all kiosks at the same time to help at operations, while passport control counters demand one officer for each passport control counter. This means less personnel costs for boarder control procedures while improving service quality.

6. CONCLUSION

The main objective of this work was the simulative investigation of disruptive scenarios in the context of passenger processing systems in international airports. The five scenarios built were characterized according to different literature sources, which provided intermediate parameters and thereby neither too conservative nor too optimistic results. The components and respective attributes of logical systems constructed with the simulation tool can be used as a basis for modeling other simulation scenarios of airport terminal systems.

Through comparison between the scenarios modeled, statements regarding infrastructure and operational efficiency could be derived. Comparisons between typical operations and disruptive scenarios are particularly important, since they provide assessment for deployment of new equipment, procedures, and concepts. Additionally,

knowledge about operational performance in case of disruptive events provide helpful information for decision making also in this kind of situation.

The outcomes of this work also provided useful data for airport terminals of a range of magnitudes and types, being a generic tool that can be used by many airport operators around the world, despite considering European properties as standard.

Among the possibilities for further development of our work are: the confirmation of the model validity though empirical data; the inclusion of arriving and transfer passengers in different procedures; a more detailed modeling of passenger behavior under typical operations; the consideration of LoS-standards instead of only waiting times for service quality; as well as the consideration of partial failures and a correlation with airport terminal's resilience.

References

Alards-Tomalin, D., Ansons, T.L., Reich, T.C., Sakamoto, Y. Davie, R., Leboe-McGowan, J.P., Leboe-McGowan, L.C. (2014) Airport security measures and their influence on enplanement intentions: Responses from leisure travelers attending a Canadian University. *Journal of Air Transport Management* 37, pp. 60-68.

Alodhaibi, S., Burdett, R.L., Yarlagadda, P. (2016) Framework for airport outbound passenger flow modelling. 2016 Global Congress on Manufacturing and Management. *Procedia Engineering* 174, pp. 1100-1109.

Bakker, D. (2015) *The Strong Case for Automated Controls at the Border*. https://www.internationalairportreview.com/article/76336/automated-border-controls/

CSES (2011) *Aviation Security and Detection Systems - Case Study*. Centre for Strategy & Evaluation Services, 27 pp.

De Graeff, J. (2020) *Innovating Airport Passenger Terminals: Determining the feasibility of new terminal concepts based on seamless flow technology*. Delft University of Technology, 108 pp.

EUROCONTROL (2006) *CDM Landside Modelling Project Phase I: Initial Scenarios*. Brétignysur-Orge Cedex, 86 pp.

IATA (2014) *Airport development reference manual*, 10th Edition. International Air Transport As-sociation, Montreal, Canada 346 pp.

IATA (2022) *Air Passenger Numbers to Recover in 2024*. March 1, 2022. https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/

Khan N., Efthymiou, M. (2021) The use of biometric technology at airports: The case of customs and border protection (CBP). *International Journal of Information Management Data Insights* 1. https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2021.100049

Lemer, A.C. (1992) Measuring Performance of Airport Passenger Terminals. Washington, DC. *Transportation Research part A*, Vol. 26A, No. 1 (1992), pp. 37-45.

Manataki, I.O., Zografos, K. (2009) A generic system dynamics-based tool for airport terminal performance analysis, *Transportation Research part C*, Vol. 17 (2009), pp. 428-433.

Metzner, N. (2020) *Untersuchung der Resilienz von Flughafenterminalsystemen auf Basis Analytischer und Simulationsbasierte Methoden*. RWTH Aachen. 206 pp.

Nowacki, G., Paszukow, B. (2018) Security Requirements for New Threats at International Airports. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. https://doi.org/10.12716/1001.12.01.22

Prevost, S. (2021) *Ten major cyberattacks against the airport industry*. Stormshield, August 16, 2021. https://www.stormshield.com/news/ten-major-cyberattacks-against-the-airport-industry/

Qualmann, D. (2019) *Simulationsbasierte Untersuchung der Resilienz von Flughafenterminalanlagen an einem generischen Terminalmodell*. RWTH Aachen, 99 pp.

Romero, P. (2020) What is a blackout? Blackouts in airports. *Tecnatom*, 27 March, 2020. https://www.tecnatom.es/blog/en/what-is-a-blackout-airports/

Schwienhorst, M.G.S. (2020) *Capacity constraints for departing passenger operations at airports: How to abolish the physical separation of Schengen and Non-Schengen passengers*. RWTH Aachen, 192 pp.

The World Bank (2020) *Air transport, passengers carried. Civil Aviation Statistics of the World and ICAO staff estimates*. https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR

TRB (2010) *Airport Passenger Terminal Planning and Design, Volume 1: Guidebook*. Transportation Research Board. Washington, DC, 421 pp. https://doi.org/10.17226/22964.

TSA (2022) *TSA PreCheck®.* Transportation Security Administration. https://www.tsa.gov/precheck

IMPROVEMENTS ON ENGLISH LANGUAGE PROFICIENCY OF ATCO AND AFIS OPERATORS OF INFRAERO (ANSP)

Marcelino Alves de Almeida Neto
Master´s Degree in Advanced Master Air Navigation System, Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC), Brasília/DF.

*** Corresponding author e-mail address**: marcelino.almeidaneto@gmail.com

PAPER ID: SIT223

ABSTRACT

The International Civil Aviation Organization (ICAO) preconizes that English proficiency is a crucial element to the aviation safety requirements due to the constant interaction between air traffic controllers or Aerodrome Flight Information Service (AFIS) operators with aircraft pilots during international operations. Most Air Navigation Service Provider (ANSP) worldwide hires air traffic controllers (ATCO) that are already capable to reach level 4 or higher of ICAO English proficiency tests. To reduce the accidents rate is crucial to invest on safety improvements, and one of the indicators that can help is the level of communication between the interested parts. It's known that not all states have inside their ANSP all the air navigation employees with full capacity to offer an air traffic service with a flawless English. That's when ANSP need to invest on education programs to incentivize their operational workforce to study and improve knowledge to reach an operational English proficiency requirement. This article identifies the need of the creation of an English language study group inside Infraero to respond DOC 9835 to spread Aviation English knowledge alongside with phraseology and Plain English to offer better and safe air traffic service to all stakeholders. By following the methodology of a permanent group of work with a defined subject, that will concentrate efforts on the results of the development of courses, pedagogical activities and focused on exchange experiences with other institutions that are experts on the topic. The objective is to complement the operational employees' formation and ensure air navigation and aviation safety conditions. The result achieved was a sequence of managerial actions to support the practices allowing more professionals to attain and maintain ICAO level 4 of English proficiency or higher.

Keywords: ICAO, English, Proficiency, Communication, Safety.

1. INTRODUCTION

Aviation English proficiency it is one of the pillars for communication between two speakers (Air Traffic Service operator and flight crew) that are from different nations. The International Civil Aviation Organization (ICAO) is very clear on DOC 9835 - Manual on the Implementation of ICAO Language Proficiency Requirement when stablishes the guidelines of capacitation and control of the level of English proficiency of the Aerodrome Flight Information Service operators, Air Traffic Controllers, and pilots.

Communication between pilots and controllers is the foundation of air traffic control (ATC; Hopkin, 1995), yet air–ground communication is in many respects the weak link of the system, with many accidents attributed to improper or misunderstood communications (Morrow, Lee, & Rodvold, 1993; Nolan, 1999; Prinzo, 1996; Prinzo & Britton, 1993).

Aeronautical Safety is deeply dependent on the procedures adopted by all operational and non-operational stakeholders and actors that are involved in aviation.

English proficiency is one important key factor in the operation of a safe and reliable air navigation system.

Brazil is a South American country with one of the greatest aircraft fleets of world and the potential to lead the aeronautical industry in our region. But despite of that, the educational system on English capacitation of our population is very incipient. In some countries around the world, it is part of the culture of the educational system the introduction from the basic education to the superior level the teaching of a second language, and this does not occur in Brazil.

According to DOC 9835, in 1998 ICAO Assembly identified an increase of number of accidents where the language proficiency of the pilot or the air traffic controller were casual or a contributing factor for the accidents. And with the reduced number of accidents caused by mechanical failure, the attention was focused on the human factor, on DOC 9835 is expressed: "*Communication is one human element that is receiving renewed attention"* because of its complexity and high possibility of different interpretations of the same topic depending on the way that communication is done.

To maintain the levels of Safety on the highest patterns, Infraero, following the recommendations of the Brazilian Airspace Control Department - DECEA, decided to implement an English proficiency capacitation program, to respond the recommendations of the superior authorities and obviously to ensure Safety among the air navigation system that they are responsible.

Aeronautical phraseology was for many years a great tool for the aeronautical crew members and air traffic services providers, because it contains lot of expressions that synthetize situations and make the communication happen. But with the growth of traffic and different kind of normal and abnormal situations, ATCO and AFIS operators alongside with pilots cannot rely only on phraseology, they need to perform a seamless communication in English to give and receive commands that can assure the Safety of air navigation operations.

Since in our country we face the problem on English capacitation, our entities needed to act to provide this knowledge to our ATCO and AFIS operators. There are two programs, that Infraero took to increase the ICAO level of proficiency of its operators:

- Intensive English Language Training Program for Air Navigation – IPNA;

- Immersive English Course at FAA at Oklahoma.

This article refers to the reality of Brazil's ANSP "*Empresa Brasileira da Infraestrutura Aeroportuária*" – Infraero which despite of providing airport infrastructure it also provided an Air Navigation Service that managed several Towers, Radios, Procedural APP and Radar APP until June of 2021. Infraero had a number of 666 Air Traffic Controllers and 141 AFIS operators, not all of them work at an operational position by the year of 2021. Some of them develop administrative procedures that are inherent to the Air Navigation process. These professionals are responsible for conducting the majority of civilian air traffic service in a country with continental dimensions with huge borders with other Latin American countries and a tremendous oceanic area to deal with.

This study will analyze the efforts that were already implemented by Infraero and DECEA in Brazil to respond DOC 9835 in order to spread the Aviation English knowledge alongside with phraseology and Plain English to offer better and safe air traffic service to all stakeholders and propose some reviews of the methods used by these agents on English capacitation of the interested parts in order to raise the level of consciousness to the Safety importance of having a select group of employees inside Infraero that are capable to face and solve air navigation demands in another language rapidly and safely.

2. METHODOLOGY

Infraero has been adopting and maintaining an English language training system for Air Navigation for years, and this company needs a study that covers and propose a methodology that will be able to take advantage of the already trained workforce. Which means, to offer an opportunity for the talents that the company has in the EPTA (Air Traffic and Service Telecommunications Provider Station) network, especially the employees with ICAO level 6 and 5 to share their knowledge, but since Infraero was struggling economically, this help was expected to be volunteer, becoming "less attractive". By the better use of such a specialized workforce, through the development and growth of professionals the study proposes the creation of a group of studies aimed at applying a more economical and efficient training modality.

The proposed Infraero English language study group will do research and will be responsible for creating trainings, workshops, specific events to establish an internal culture in Air Navigation, aiming at encouraging and sensitizing air traffic controllers and AFIS operators to the importance of safety and excellence of this subject for the flight service provided in Brazilian aviation.

This permanent work group composed by those employees with high English proficiency capacity that will volunteer themselves to be part of Group of English Study ICAO Level 4 (GESIL4). They will receive the benefits of being instructors at the company.

Currently IPNA, which is the main English capacitation program of Infraero, has generated a constant occurrence of overtime due to the study modality adopted. It is proposed to follow an action plan that follows the recommendations coming from the Air Navigation regulatory agency, the Airspace Control Department - DECEA, creating an internal solution for the cost and low adherence to the training program in question.

The trainings initially aim to attend the same IPNA target audience with all levels of English, but with mandatory participation through the availability of operational scales, thus creating an internal training as occurred with the Quality process in the Air Navigation Safety Management System - SMS.

To examinate the situation of the target audience of this paper, a survey was applied among Infraero's operators with the objective of understand the importance of English proficiency.

In this way, a Google Form with 25 questions named "Importance of English language proficiency for Infraero Air Traffic Controllers and AFIS Operators" was elaborated, to run a diagnosis of information and opinions/impressions of air traffic controllers of APP, Towers and AFIS operators about the significance of the English language in their professional and personal life, their opinion about the methodologies used by Infraero to train and capacitate the operators and finally to ask some questions about what others methodologies could be used to develop their language skills.

The survey was directed to ATCO and AFIS operators from Infraero in the period of September 2020 to February 2021. The population of the survey was 807 employees. There were 172 answers to the form, the sample error was 5% and the confidence interval was 90%.

The following 8 graphics illustrates important information concerning topics of age range, level of education, domain of the English language, confidence when speaking on radiotelephony in English, importance of learning a language to work in aviation, and other topics.

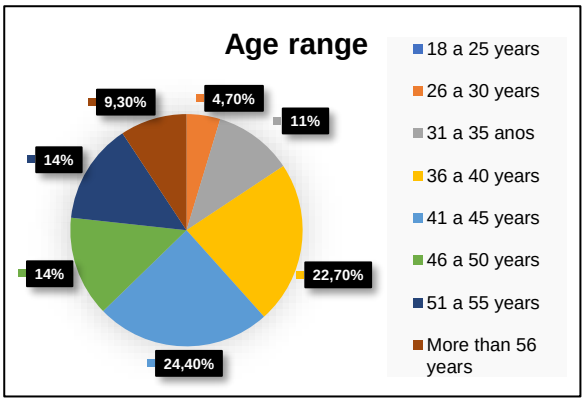


Figure 1 - Survey question 2. Source: Own elaboration.

Regarding the age range, there is a very diversified scenario in the sample where none of the employees who answered the survey declared to be between 18 and 25 years old. 4.70%, equivalent to 8 answers, declared to be 26 to 30 years old. 11%, equivalent to 19 respondents, declared to be 31 to 35 years old. 22.70%, or 39 people, declared to be 36 to 40 years old. The majority 24.40% (42 people) stated they were between 41 and 45 years old. 14% (24 people) confirmed being 46 to 50 years old. 14% (24 people) declared they were between 51 and 55 years old. And finally, 9.30% (16 people) of the interviewees reported being over 56 years old.

From the sample who answered the survey, 84,40% has the age above 36 years, which reinforces the hypothesis of Infraero´s having an old public to deal with when it comes for starting to train the English language for ATS.

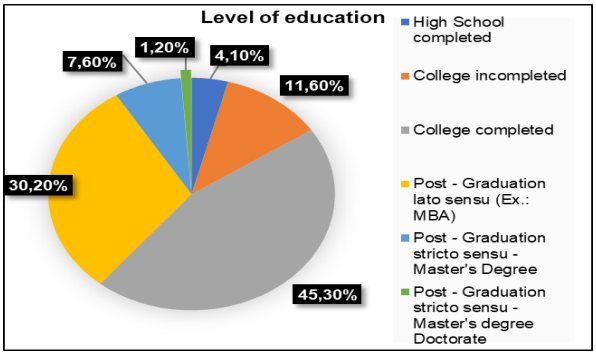


Figure 2 - Survey question 3. Source: Own elaboration.

According to the answers about the level of education, 4.10%, corresponding to 7 people, responded that they still have the same level of education required for the position of ATCO or AFIS operator since the public contest to work at Infraero. 11.60% (20 people) stated that they had an incomplete college degree. 45.30% (78 people) affirmed having completed the higher education level. An interesting fact is that 30.20% (52 people) of the interviewees have a lato sensu post-graduation degree. 7.60% (13 people) stated that they had a stricto sensu post-graduation - master's degree. Finally, 1.20% declared they had a stricto sensu post-graduation - doctorate. These data reveal a sample of mature professionals who have been specializing, mostly encouraged by the financial benefit related to the incentive to study that Infraero pays to its professionals.

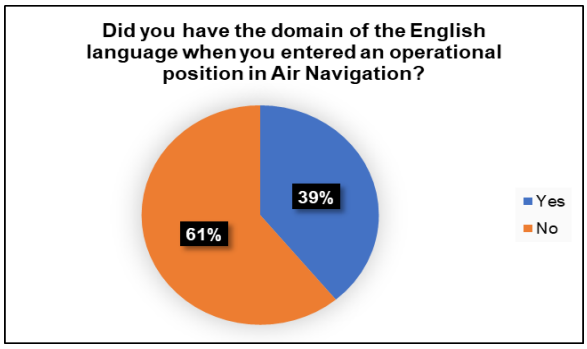


Figure 3 - Survey question 4. Source: Own elaboration.

61% (105 people) reported that they were not proficient in English when they entered an operational position in air navigation. And 39% (67 people) stated that they were proficient in the language when they occupied an operational position. This means that a high number of people recently hired by Infraero entered air navigation without being able to communicate in English. This demonstrates the need for stricter criteria for hiring, such as requiring the TOIC exam (as in foreign countries) or applying during the selection of the position the English language as an eliminatory content.

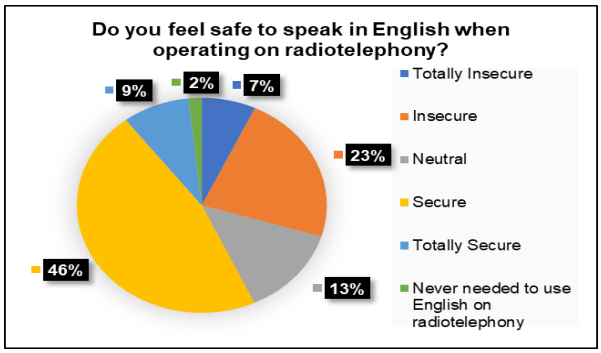


Figure 4 - Survey question 12. Source: Own elaboration.

In the graph above it is illustrated the confidence levels of operators when operating in English in radiotelephony. 46% (80 people) feel secure. As well as 9% (15 people) feel totally secure. On the other side, 7% (12 people) declares that they feel totally insecure to operate in English, 23% (39 people) state that they feel insecure to operate and 13% (23 people) report feeling neutral to the situation and 2% (3 people) never needed to use English on radiotelephony. This portrait shows how operators feel when facing the language barrier combined with a complex professional activity that demands a lot of mental load. The diffusion of the culture of English language practice is necessary to raise the confidence levels of air navigation operational employees and consequently increase the levels of safety.

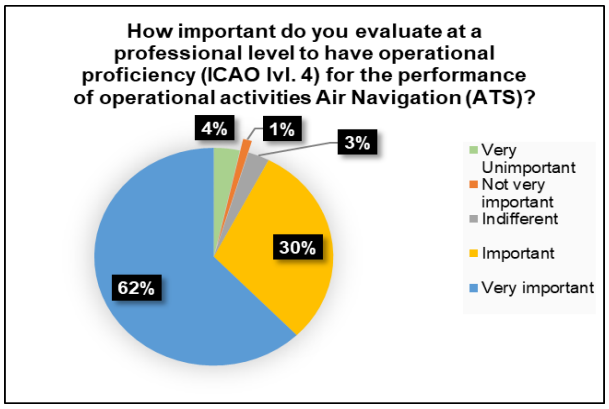


Figure 5 - Survey question 15. Source: Own elaboration.

4% (6 people) considered it very unimportant to have operational proficiency (ICAO level 4) to work in air navigation. 1% (2 people) evaluated that it is not very important to have operational proficiency in English. 3% (5 people) think that it is indifferent to have ICAO level. But for 30% (52 people) of the respondents, it is important to have the operational level proficiency. And finally, 62% (107 people) assure that it is very important to have ICAO operational level 4. This means that even though the employees do not have a deep knowledge of the English language, they understand that at the professional level there is a great need to have a level of English that helps in the performance of air traffic service. It was registered the fact that there are still air navigation operators who declares that professionally, mastering a foreign language cannot contribute to a better performance of the profession.

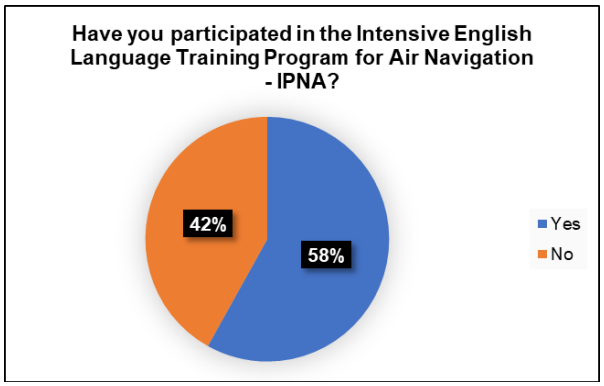


Figure 6 - Survey question 18. Source: Own elaboration.

Although IPNA has been implemented for some years now, a good number of air navigation employees, specifically ATCOs and AFIS operators have not yet had the opportunity to participate in an intensive English language training program. It is known that many times the non-participation is because EPTA is not the target audience of the program, consequently a good number of employees may not have had the opportunity to participate in such training. Which reinforce that due to financial problems, Infraero was able to focus the English trainings only at international airports. Of the interviewees, 58% (100 people) answered that they had already taken the IPNA, and 42% (72 people) stated that they had not had the chance to take the IPNA yet. This shows the need to expand both the target audience and the scope of this training program to include a larger number of operators who need English language training.

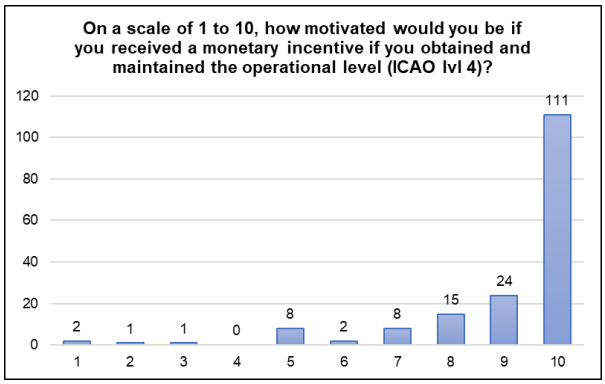


Figure 7 - Survey question 20. Source: Own elaboration.

This question meets one of the proposed objectives for improving English language

communication for ATCOs and AFIS operators of this article. And it reflects not only a reality, but also a need that the operators have for both English proficiency and an incentive to achieve and maintain it. It is known that there will be an increase in costs, but the survey and the research indicate that this is one of the best tools to maintain acceptable levels of English proficiency among Infraero operators. This demand has not been conquered within Infraero for external and specific reasons, but for Nav Brasil this is a plausible proposal, since it is a future air navigation company. By granting a financial incentive for employees who reach levels 4, 5 or 6 of ICAO, a large number of employees, as shown in the chart above, will be trained to master the language, thus creating a positive chain of knowledge.

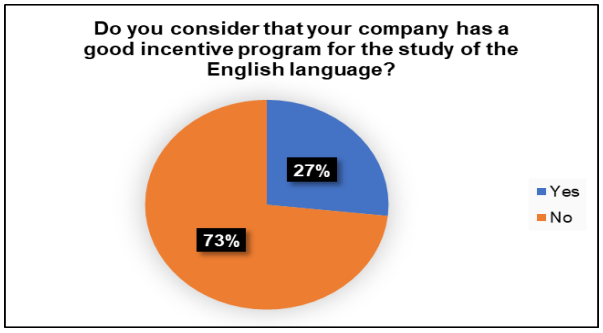


Figure 8 - Survey question 24. Source: Own elaboration.

The policy of study incentives through reimbursement present in the IPNA is considered by 27% (46 people) of those interviewed as a good incentive program by Infraero. However, for 73% (126 people) the company does not offer a good study incentive program for practicing English. This represents the immediate need for a review and reformulation of how to improve the way employees are supported to develop and maintain their language skills.

By the data collected with the survey it can be deduced that Infraero were facing difficulties with the operational crew (ATCO and AFIS operators) considering English Proficiency capacitation. Even with the measures taken until the moment of the present research, this study concludes that complementary actions must be executed by the managers of the Superintendence of Air Navigation of Infraero.

3. MANAGERIAL ACTIONS OF INFRAERO

The strategy on English Proficiency for air navigation operators inside Infraero, must stablish priorities and elevate the level of charge through rigorous application of tests. Another point to be evaluated is to evolve inside the operators the culture of the importance of having a second language to work in the aviation business, in this case English is fundamental and it is an obligation by ICAO. Today, there is no setback to not having an English proficiency level of 4 (Operational) or higher. Even though, due to characteristics of our country (continental dimensions with a non-native population in the English language) and the fact that most employees inside Infraero are in a high age group and were hired when English was not a requirement, this management peculiarity created a lack of proficiency on the language.

The following topics will describe a set of operational guidelines and below the topic there is the explanation of how each of them will be performed on this study. They will compose a portfolio of actions to be developed and applied in the future.

- Creation of a permanent group of work to develop English capacitation courses, pedagogical activities and exchange experiences;

On this article it is proposed that a group of remarkable English instructors, professors, researchers that already works among Infraero´s ATCO and AFIS operators, most of them with ICAO Proficiency level 5 or 6, to be part of the Group of English Study ICAO Level 4 (GESIL4). The objective is to complement our operational employees' formation and ensure air navigation and aviation safety conditions by applying small courses to develop the level of English of those operators that are having unsatisfying results on EPLIS (SISCEAB - Brazilian Airspace Control System - English Language Proficiency Examination). In a way that the most experienced (ICAO level 6) will train other operators with lower level of proficiency and creating a chain of knowledge.

To fulfill the objective the GESIL4, which is an Air Navigation initiative, the

members will have access to all English capacitation resources inside Infraero and will propose new methodologies to approach the teaching of English to the necessities and requirements of the operators. The strategy is to train the ATCO and the AFIS operators at Infraero with lower costs than the ones used until nowadays and more effectively.

On this pandemic time, we were instigated to find new solutions, and the remote work has broken many paradigms, so that now the costs of moving a team to develop or apply a language course can be reduced, after all the process can be done via videoconference. Thus, all travel and accommodation costs can be reduced to optimize the whole training process, including the possibility of inviting professionals from other countries or cities to contribute to the aviation English language proficiency process.

- Organization of the event "Phraseology Week" in 2021 with the suggestion of the focus on English language;

From 2018 to 2019 the DONA (Infraero´s Air Navigation Superintendence) executed an action called Phraseology Week after the conclusion of a working group that decided, due to lack of investments, a complete training of phraseology could not be able to be applied on all EPTA of Infraero around Brazil.

Due to the short period of time and budget restrictions, the working group established as a standard format of the event, a workshop for ATC and AFIS operators operating in Control Towers, Approach Controls and/or AFIS. In order to provide the themes to be observed at the workshop and to raise awareness among the target audience, the monitoring tools already consolidated in the network should be used. The tools must provide real data to enrich the content of the event to be held and contribute to the recycling of information for operators and may also serve as a good source of material for the elaboration of the workshop.

The event can include lectures on the theme, advertisements via e-mail, murals etc. It should include an awareness lecture with the operations area of the airport, using examples occurred in the locality or that are of knowledge of other EPTA, subsidized by the Safety Management System (SMS).

For 2021, it was encouraged, as a suggested theme, managers and employees involved in the process to focus on English Language Phraseology and its applications in ATC and AFIS, in addition to those contained in the legislation of DECEA MCA 100-16 Air Traffic Phraseology, such as: the impacts that not knowing the English language can have on air navigation operations, possible consequences such as incidents and accidents, and the lack of English language proficiency, as well as the lack of English phraseology can affect the SMS performance.

- Encourage the use of the air traffic control simulator for the training of situations of use of the English language in addition to the phraseology;

In the past years Infraero bought computers and a software to execute trainings on 3D simulators on the EPTA that has Control Towers. On the same package there are communication devices that can simulate ATC communications between ATCO and pilots, this ambient is suitable for the practice of English phraseology and other types of proficiency training.

As a recommendation of this study, and by knowing of this installed computational infrastructure, each EPTA that has these devices should develop inside their training program of the ATCO an instruction plan to build an environment where the trainers may familiarize with authentic traffic situations and English phraseology as well as critical and normal situations with this foreign language.

- Analysis of IPNA program and EPLIS;

The IPNA is a program created by Infraero with the objective to make feasible the training of employees in the Air Navigation area who perform operational activities directly related to oral communication, in the use of the English language, subsidizing their participation in English language courses, in teaching institutions, until they reach the Advanced Level of knowledge in the language or Operational Level 4 in EPLIS (whichever comes first), applied by DECEA/ICEA, as established by ICAO.

On the present study, access to the IPNA archives were granted and it was possible to reach information about the students that are

performing the trainings to prepare themselves to the EPLIS examination applied by DECEA/ICEA during the year of 2012 and access to a historic of performance of the students on EPLIS from 2007 to 2012. The EPLIS exam that is composed of 2 phases: the first phase is done on the computer and consists of 30 questions with 3 alternative answers, with the statement and alternatives in Portuguese and the audio of the question in English. The test lasts 70 minutes and the candidate is ready for the next phase if he/she gets 2/3 of the test (20 questions) right. In the second phase, the candidate is interviewed by two professionals, one interlocutor and one evaluator, who measure the candidate's performance in the use of general English, but with an aeronautical focus, in speaking and understanding, according to the descriptors of the Scale of English Language Proficiency Levels established by ICAO.

- Review of IPNA Manual;

The IPNA program is one of the main initiatives of Infraero on English capacitation and it is important in many aspects, but the time has come to Infraero managers reanalyze the prerogatives inside the program's manual like its forces and weakness and resubmit it with new rules.

The items of the IPNA manual needs to be discussed on creating manners to make the employee to take the training more seriously through clauses in the manual that provide for greater punishments and that require the enrolled employee to fulfill the full course load of the program which is 48 months. One of the problems that this program deals with is about disconnection and reimbursement. In some cases, the employee leaves the program without a fair justification and all the money invested on its capacitation is lost. There´s a necessity to define ways to prevent that Infraero loses its investment on the capacitation of the student. So, it needs to be clear that even when the participant of the program fulfills the entire course load, if he or she was not approved on EPLIS examination they would have to reimburse all the investment and the overtime hours back to Infraero.

- Study to stablish new rules for financial bonus as an incentive for operators that attain the ICAO Operational Level (Level 4) or above;

Infraero has a development program with incentives for employees who have undergraduate, graduate and master's degrees to study through financial compensation of a percentage on the base salary.

It is evidence that both the International Civil Aviation Organization, the Airspace Control Department and Infraero carry out English language training projects through specific programs for both air traffic controllers and aeronautical telecommunication station operators who can reach different levels (from 1 to 6) of English language proficiency after taking ICAO exams. Ideally, operators should reach operational proficiency level (4) or higher.

The proposition that this study provides is that Infraero, if applicable, starts to offer a financial incentive, a bonus in salary, to operational employees who reach ICAO proficiency levels 4, 5 and 6. Thus, the bonus in the employee's salary, under these conditions, will allow the employee to be recognized for the personal effort made to achieve the required level, and consequently, if he loses the qualification he will lose the bonus.

Currently the percentage of the educational incentive that Infraero offers varies according to the employee's level of education. If the employee occupies a mid-level position and has a college degree, an additional 7% of base salary is provided. If the employee occupies a senior position and holds an MBA or specialization, an additional 9% of base salary is provided. If the employee has a master's or doctorate degree, the additional base salary is 11%.

The present study proposes a similar logic of bonification for the ICAO English language proficiency level:

- An additional of R$ 200,00 on base salary for the ATCO or AFIS operator who reach ICAO English proficiency level 4;

- An additional of R$ 300,00 on base salary for the ATCO or AFIS operator who reach ICAO English proficiency level 5;

- An additional of R$ 400,00 on base salary for ATCO or AFIS operator who reach ICAO English proficiency level 6.

The above proposal is not only the most desired by the employees, but also the most daring since it involves high costs for the company.

- Organization of English training courses in company;

Infraero has the content for Air Navigation, specifically for IPNA and EPLIS that is hosted inside an educational platform of Infraero called Infr@educ from Infraero University. This ambient is based on Moodle technology and is designed for distance learning mode.

In a first analysis, the costs involved in the process of organizing English training courses in company would not bring a very significant cost for Infraero, since it only requires hiring an English teacher to analyze the content of the digital platform and guide a regular employee to make the macro adjustments. The problem is that on the platform the contents are partly disorganized and outdated, requiring a dedicated work group to update all the material.

4. CONCLUSION

With the present study, it can be deduced that there are obstacles for improving English language communication inside the Brazilian public company and the main one is the human factor combined with financial restrictions and this is a difficult scenario to overcome, this premise was present on Infraero´s reality.

Analyzing the data and the impressions collected during the research, it was possible to realize by the results that the employees are not deep interested on study of the English language applied to aviation purposes. One of the reasons for this is that being Brazil a country with continental dimensions, some localities are on cities or regions more remotes with poor interaction with international air traffics which can contribute to the sensation that having English proficiency is not important.

Another point is that Brazil has a cultural difficulty for being a country that teaches basic education, in general only in Portuguese, this condition affects the quality of the specialized work force offer. This combined with the resistance that older employees in the company have in learning a new language, makes the scenario even more problematic to overcome.

Since 2013 Infraero do not hires professionals, and the current work force are becoming old, and with less incentive to study they will remain in the same condition. Infraero does not have spare employees to replace others vacancy and the impression is that the model managed by the company for some locations, was used only to obtain overtime by those enrolled in the IPNA, with poor operational results.

There are many activities that requires the Infraero´s Air Navigation Superintendence - DONA attention, but one accident is responsible for changing all the process and highlight deficient aspects that were hidden. This article emphasizes a latent problem that is gradually increasing and that can be a contributing factor to an aircraft incident or accident as foreseen in ICAO documents. It is important that this financial issue is quickly resolved to enable training programs to be implemented to protect operators and the air traffic service. Perhaps this was one of the intentions of NAV Brasil's (Brazilian public company responsible for civilian air navigation services since June of 2021) idealizers when they proposed the creation of the company after Infraero faces its inner issues, to protect the Brazilian air navigation system.

On this research, a specific limitation was the access of data regarding the costs of the courses that were already implemented at Infraero and the historic about the IPNA program. The period that was analyzed was from 2007 to 2012. Even with the request of data to the corresponded area, the study was limited to this period. That is the importance of the survey, to subsidize this article with recent information and impressions from the English capacitation process by the ATCO and AFIS operators of Infraero.

To conclude, the situation that brought limitation to the present research was certainly the pandemic. Performing the research remotely made it quite difficult to have direct access to key people for the process of obtaining information and data that would compose this work. Even so, it was possible to

describe on this article decisions that occurred in the management of the English language training process at Infraero.

For future opportunities this article instigates Infraero / Nav Brasil to the possibility to establish partnership with other public organs such as ANAC that has the same responsibility on capacitating in English language pilots and civil aviation stakeholders and interact closely with the English capacitation areas of DECEA, ICEA and its organisms of research in the field of linguistics specific for aviation and air navigation.

5. REFERENCES

BRASIL. (2011). Ministério da Defesa Comando da Aeronáutica. Licenças e Certificados de Habilitação
Técnica para Controladores de Tráfego Aéreo: ICA 100-18. Brasília.

BRASIL. (2016). Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Preparação Básica para Instrutores de Inglês Aeronáutico: MCA 37-190. 1ª ed. Brasília.

BRASIL. (2018). Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Manual dos Requisitos de Proficiência em Inglês Aeronáutico: MCA 37-225. 1ª ed. Brasília.

DECEA. (2020). Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Manual do Candidato EPLIS. 1ª ed. Rio de Janeiro.

DECEA. (2021). Departamento de Controle do espaço Aéreo. Publicações. Fraseologia de Tráfego Aéreo: MCA 100-16. 1ª ed. Rio de Janeiro. Available from:<https://publicacoes.decea.mil.br>

Dudley-Evans, Tony. (1998). Developments in English for Specific Purposes: A multidisciplinary approach. Cambridge University Press.

ICAO. (2001). International Civil Aviation Organization. Annex 1 – Personnel Licensing. 10th ed. Montréal.

ICAO. (2004). International Civil Aviation Organization. Doc 9835 - Manual on the Implementation of ICAO Language Proficiency Requirements. 1st ed. Montréal.

ICAO. (2006). International Civil Aviation Organization. Annex 10 – Aeronautical Telecommunications – v. II. Montreal.

ICAO. (2007). International Civil Aviation Organization Doc 4444 - Procedures for Air Navigation Services / Air Traffic Management. 15th ed. Montréal.

ICAO. (2009). International Civil Aviation Organization. Cir 323 - Guidelines for Aviation English Training Programmes. 1st ed. Montréal.

INFRAERO. (2012). Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Relatório dos Resultados do EPLIS. 1ª ed. Brasília.

INFRAERO. (2018). Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Manual do Programa de Capacitação Intensiva na Língua Inglesa para a Navegação Aérea – IPNA. 1ª ed. Brasília.

INFRAERO. (2020). Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Manual do Programa de Capacitação Intensiva na Língua Inglesa para a Navegação Aérea – IPNA. 1ª ed. Brasília.

O SISTEMA DE ACESSO TERRESTRE AOS AEROPORTOS SANTOS DUMONT E GALEÃO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

Matheus Novaes Valinho[1]*, Giovanna Miceli Ronzani Borille[2], Anderson Ribeiro Correia[3], Marcelo Xavier Guterres [4]
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)[1,2,3,4]

***Endereço de e-mail do autor correspondente:** valinho@ita.br

PAPER ID: SIT217

ABSTRACT
It is notable that the growth of the aeronautical industry allowed competition for passengers, airlines and cargo. Currently, competition between airports is seen as progress in air transport, in this context, offering better operational services, land access, low costs of aeronautical activities, among others, are part of the management plan of an airport. This article presents a comparison of the time taken to access the airport between Galeão and Santos Dumont airports, located in the metropolitan region of Rio de Janeiro. Therefore, the Origin/Destination method was applied to evaluate the means of land access to airports, according to the variables: (i) distance, (ii) private transport, (iii) public transport and (iv) travel time. The results obtained determined the possible preferences of passengers from this region in relation to the study airports. Thus, pointing out the factors that can interfere in the choice of the airport, in addition to helping the user, it also contributes to the growth of literature in the scope of access, presenting indicators that are relevant for improving the management of airport administrators in the search for new users, and consequently, increase even more the competitiveness between them.

Keywords: Origin-Destination; Airport access; Transport modes.

RESUMO
É notável que o crescimento da indústria aeronáutica permitiu a competição por passageiros, linhas aéreas e carga. Atualmente, a concorrência entre aeroportos é vista como um progresso do transporte aéreo, neste contexto, as ofertas de melhores serviços operacionais, acesso terrestre, baixos custos de atividades aeronáuticas, entre outros, fazem parte do plano da gestão de um aeroporto. Este artigo apresenta a comparação do tempo gasto para a acesso ao aeroporto entre os aeroportos Galeão e Santos Dumont, situados na região metropolitana do Rio de Janeiro. Para tanto, foi aplicado o método Origem/Destino para avaliar os meios de acesso terrestre aos aeroportos, segundo as variáveis: (i) distância, (ii) transporte particular, (iii) transporte público e (iv) tempo de viagem. Os resultados obtidos determinaram as possíveis preferências dos passageiros oriundos desta região em relação aos aeroportos de estudo. Assim, apontando os fatores que podem interferir na escolha do aeroporto, além de auxiliar o usuário, também contribui para o crescimento da literatura no âmbito de acesso, apresentando indicadores que são relevantes para melhoria da gestão das administradoras aeroportuárias na busca de novos usuários, e consequentemente, aumentar ainda mais a competitividade entre si.

Palavras-chave: Origem/Destino; Acesso aeroportuário; Modais de transporte.

1. INTRODUÇÃO

Para Moura et al. (2020), a competitividade aeroportuária está diretamente relacionada à desenvolvimento do transporte aéreo, busca pela melhoria da capacidade de produção de serviços, ao crescimento da movimentação de passageiros e linhas aéreas, acessibilidade e otimização do fluxo ao usuário, custos de atividades aeronáuticas e não aeronáuticas, entre outros, fazem parte do plano da gestão de um aeroporto. As organizações aeroportuárias devem ser eficazes e eficientes em seu núcleo de negócios.

Para designar um aeroporto como competitivo, é necessário estudar e analisar a estrutura operacional desses aeroportos para conhecer profundamente cada variável competitiva e como o aeroporto aplica suas estratégias para obter um resultado final sobre os fatores competitivos existentes como acessibilidade, rotas, companhias, população local, entre outros.

Segundo Birolini et al. (2019), a acessibilidade terrestre ao aeroporto é amplamente reconhecida como um grande fator de impulsão para o seu desenvolvimento. Com o mercado de passageiros aéreos em crescimento e o aumento da concorrência, garantir acesso ágil ao aeroporto é fundamental para sustentar a sua evolução e, consequentemente, criar competitividade com aeroportos vizinhos e também com outros modais de transporte.

Rothfeld et al. (2019) afirma que a redução do tempo gasto no percurso até o aeroporto e no check-in são considerados primordiais para a otimização da viagem. Analisar as rotas de acesso são, portanto, cruciais para detectar as alavancas de transição para um transporte mais potencializado.

A região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro engloba 22 municípios (IBGE, 2020). Na capital estão presentes dois grandes aeroportos que disputam entre si um dos maiores movimentos de passageiros do Brasil dentro de uma mesma área de influência, são eles: Galeão Internacional (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ).

Para o transporte aéreo de passageiros, segundo a Administradora RIOgaleão (2021), o Aeroporto Galeão atualmente dispõe de 20 companhias aéreas e 51 destinos, sendo 25 internacionais. O Aeroporto Santos Dumont, por sua vez, tem disponíveis 4 companhias e 19 destinos nacionais, conforme dados de movimentação aeroportuária da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2021).

A administradora nacional Infraero era responsável pela operação de ambos os aeroportos. A partir do ano de 2014, foi dado início à concessão do Aeroporto do Galeão, sendo assumido pela RIOgaleão (ANAC, 2014). A Figura 1 apresenta em uma série histórica, dos anos de 2010 a 2020, o movimento de partidas domésticas dos dois aeroportos.

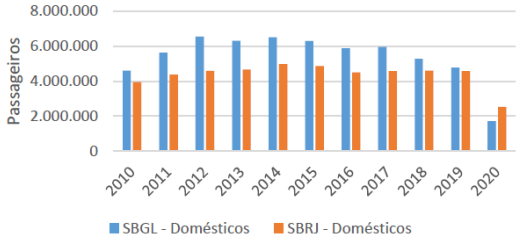


Figura 1 Movimentação de passageiros dos aeroportos SBGL e SBRJ (partidas domésticas). Fonte: Adaptado de Dados Estatísticos do Transporte Aéreo – Voos e operações aéreas, ANAC (2021).

Inicialmente, observa-se na Figura 1 uma discrepância em relação à movimentação no ano de 2020 para os anos anteriores, o que pode ser justificado pela pandemia mundial. Para o SBGL, nota-se que houve um crescimento de 2010 a 2012, a partir de 2014 os números de partidas domésticas decresceram, coincidentemente a partir deste ano foi dado início à sua privatização conforme mencionado anteriormente. O SBRJ apresentou pequenas oscilações em suas movimentações neste período, no ano de 2019 exibe valores bem próximos de seu concorrente.

O objetivo deste trabalho é apresentar, por meio da matriz origem/destino, a eficiência do sistema de acessibilidade terrestre dos passageiros aos aeroportos SBGL e SBRJ, partindo das cidades da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Neste estudo será avaliada a comparação das rotas entre os dois aeroportos, baseadas em dois períodos: fluxo de tráfego normal e fluxo de tráfego em horário de pico.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta a revisão de literatura relacionada à acessibilidade terrestre ao aeroporto, os principais métodos encontrados e ca-

racterísticas. O capítulo 3 trata detalhadamente da metodologia aplicada, com a delimitação do estudo e a adaptação origem/destino. Por fim, o último capítulo discorre sobre os principais resultados e conclusões.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção, é apresentada uma breve revisão de literatura baseada em aplicações metodológicas de verificação da acessibilidade de uma infraestrutura aeroportuária, primeiramente é fundamental avaliar quais indicadores necessitam ser observados e aplicados a ela.

A Tabela 1 traz uma revisão sinóptica que tem como objetivo um aprofundamento aos estudos sobre os principais indicadores que poderiam influenciar o acesso a um aeroporto.

Tabela 1 Revisão sinótica da literatura

Autores	Métodos	Principais indicadores
Moreno, 2003	Modelo condicional logit	Distância e Tempo de viagem
Braga, 2008	SIG especializado em transportes	Tempo de viagem, Modalidade de transporte e Nova área de influência de aeroporto
Mamede, 2009	Análise estatística de entrevistas	Tempo viagem, Custos de acesso e Confiabilidade do serviço
Koster, 2011	Escalonamento de Noland e Small	Tempo de viagem
Jia, 2013	SAGA GIS e rede de serviço espaço-temporal	Distância e Tempo de viagem
Bao, 2016	Modelo de acessibilidade aeroportuária com base em custos	Acesso ao aeroporto, número de companhias aéreas, PIB, produção industrial e renda
Pasha, 2016	Modelo logit multinomial, Modelo logit aninhado, Logit aninhado cruzado, Modelo logit misto	Características socioeconômicas/ demográficas, características da viagem, opções de modais disponíveis e as geografias das estradas

Os estudos apresentados evidenciam dois métodos com maior frequência, Regressão Logística (logit) e Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Sendo estes, utilizados para a análises de fatores que influenciam no acesso ao aeroporto (Moreno & Muller, 2003; Braga & Guedes, 2008; Jia et al., 2013; Pasha & Hickman, 2016).

Este trabalho estende a área de estudo de acessibilidade aeroportuária, com base em uma análise em tempo real das rotas, distância e tempo de viagem das cidades da Região Metropolitana do Rio de Janeiro até os importantes aeroportos SBGL e SBRJ. O que difere de Moreno, que faz uma análise na Região Metropolitana de São Paulo, com foco nos aeroportos de Guarulhos Internacional (SBGR) e Congonhas (SBSP).

Este levantamento bibliográfico apresenta variáveis consideradas primordiais para a análise de acessibilidade de aeroportos: tempo de viagem, distância e tipo de transporte. Além de outros indicadores como custos de acesso, número de companhias aéreas, confiabilidade de serviço, características socioeconômicas e demográficas, entre outros, também foram evidenciados na revisão.

3. APLICAÇÃO METODOLÓGICA E DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Para alcançar a análise do acesso terrestre dos aeroportos de estudo, o desenvolvimento metodológico deste artigo foi dividido em três etapas: (i) Delimitação dos parâmetros de estudo; (ii) Aplicação metodológica: Simulação Origem / Destino; e, (iii) Análise descritiva e gráfica.

Para estimar os efeitos da acessibilidade dos aeroportos de SBGL e SBRJ foi necessário delimitar a área para obter um recorte regional.Adotamos uma área de influência desses aeroportos (buffer de 60km apresentado na Figura 2) se sobrepõem parcialmente entre si, o que torna ainda mais relevante obter a análise de seus acessos. Para compatibilização dos dados de origem e destino foi utilizada a ferramenta Google Maps, sendo as origens, os 22 municípios da Região Metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, e os destinos, os aeroportos Galeão e Santos Dumont.

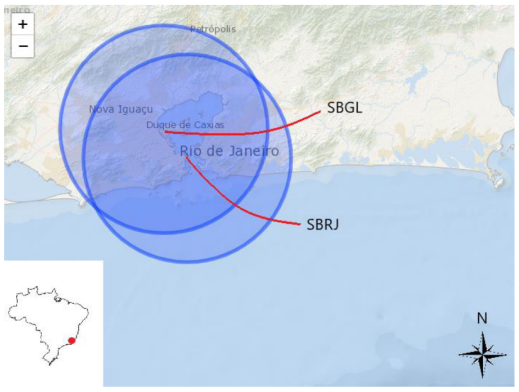


Figura 2 Área de influência dos aeroportos SBGL e SBRJ. Fonte: Autor (2021).

A rede de transporte público da cidade do Rio de Janeiro dispõe de seis modais, sendo Ônibus, Metrô/Trem, Veículo Leve sobre Trilhos (VLT), *Bus Rapid Transit* (BRT) e Barcas. As Tabelas 2 e 3 apresentam os modais de transporte público disponíveis de cada cidade da Região Metropolitana e até os aeroportos.

Como pode ser observado nas Tabelas 2 e 3,

Tabela 2 Modais de transportes públicos disponíveis para o acesso aos aeroportos SBGL

Município	Ônibus	Metrô/ Trem	VLT	BRT	Barca
Belford Roxo	X	X		X	
Cachoeiras de Macacu	X			X	
Duque de Caxias	X	X		X	
Guapimirim	X	X		X	
Itaboraí	X				X
Itaguaí	X	X		X	
Japeri	X	X		X	
Magé	X	X		X	
Maricá	X				
Mesquita	X	X		X	
Nilópolis	X	X		X	
Niterói	X				X
Nova Iguaçu	X	X		X	
Paracambi	X	X		X	
Petrópolis					
Queimados	X	X		X	
Rio Bonito	X			X	
Rio de Janeiro	X	X	X	X	X
São Gonçalo	X			X	X
São João de Meriti	X	X		X	
Seropédica	X	X		X	
Tanguá	X			X	X

Tabela 3 Modais de transportes públicos disponíveis para o acesso aos aeroportos SBRJ

Município	Ônibus	Metrô/ Trem	VLT	BRT	Barca
Belford Roxo	X	X	X		
Cachoeiras de Macacu	X				
Duque de Caxias	X	X	X		
Guapimirim	X	X	X		
Itaboraí	X				X
Itaguaí	X	X	X		
Japeri	X	X	X		
Magé	X	X	X		X
Maricá	X		X		X
Mesquita	X	X	X		
Nilópolis	X	X	X		
Niterói	X				X
Nova Iguaçu	X	X	X		
Paracambi	X	X	X		
Petrópolis					
Queimados	X	X	X		
Rio Bonito	X		X		X
Rio de Janeiro	X	X	X	X	X
São Gonçalo	X		X		X
São João de Meriti	X	X	X		
Seropédica	X	X	X		
Tanguá	X		X		X

existem algumas singularidades nos acessos dos aeroportos. De modo geral, SBGL não conta com o acesso ao "VLT", ao contrário de SBRJ que não possui para "BRT". Ressalta-se ainda que a cidade de Petrópolis é a única no qual não dispõe de nenhum modal de transporte público para SBGL e SBRJ.

A Figura 3 apresenta a diferença entre as distâncias dos municípios da Região Metropolitana em relação aos aeroportos de estudo. Salientando que a cidade do Rio de Janeiro que possui sua distância variável por ser a sede dos dois aeroportos.

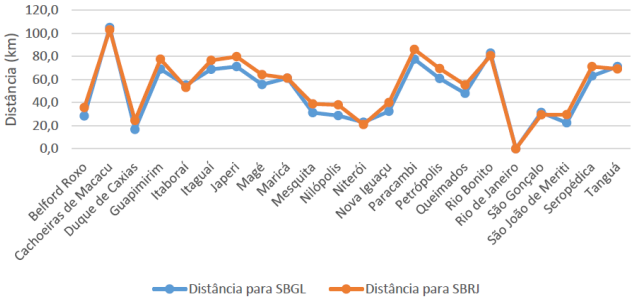


Figura 3 Distância entre as cidades da Região Metropolitana do Rio de Janeiro até SBGL e SBRJ. Fonte: Autor (2021).

Como pode ser observado na Figura 3, as distâncias não apresentam tantas desigualdades, uma vez que os dois aeroportos estão localizados na mesma cidade. Ressalta que a distância entre os aeroportos é de aproximadamente 20 km.

Para a realização da comparação entre a acessibilidade dos dois aeroportos, foi efetuada uma simulação em dois períodos: Tráfego normal entre 09:00 e 10:00; Tráfego em horário de pico entre 17:30 e 18:30. As Figuras 4 e 5 exibem as simulações para os diferentes cenários, contendo o tempo médio de acesso aos aeroportos utilizando carro (TC) e transporte público (TTP).

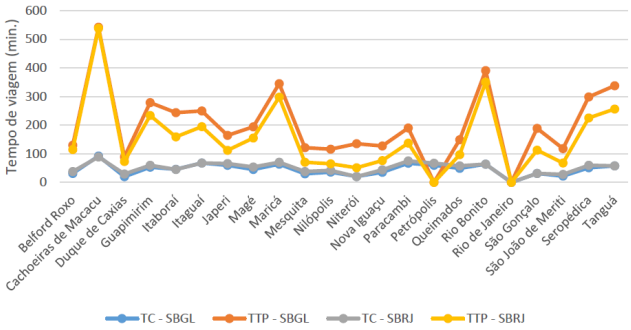


Figura 4 Tempo gasto no deslocamento no cenário de tráfego normal. Fonte: Autores, adaptada de Google Maps, (2021).

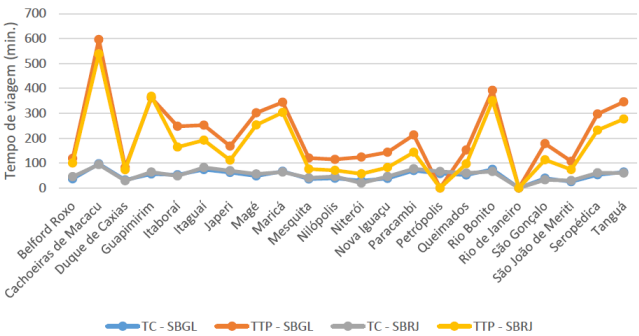


Figura 5 Tempo gasto no deslocamento no cenário de tráfego em horário de pico. Fonte: Autores, adaptada de Google Maps, (2021).

Conforme as Figura 4 e 5, os tempos de

acesso de carro (TC) apresentam diferenças mínimas para o acesso aos aeroportos. Por sua vez, os tempos de viagem de transporte público (TTP) apresentam uma certa discrepância na relação de SBGL e SBRJ, sendo para Santos Dumont o itinerário de maior eficácia.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O atual estudo apresentou uma contribuição com a abordagem metodológica de Origem/Destino, que permitiu obter, através de simulação de rotas, uma análise da acessibilidade dos principais aeroportos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (SBGL e SBRJ) sobre as variáveis tempo de viagem de carro e transporte público.

Os resultados obtidos demonstram que a comparação do tempo de viagem utilizando carro para o acesso aos aeroportos não geram uma competição entre si, pois os valores estão muito próximos. Porém, o fluxo de tráfego no horário de pico pode variar de acordo com a localidade e eventuais acontecimentos (acidentes, etc.). Neste contexto, ressalta-se que o acesso terrestre ao SBGL é dado por duas pontes (Ponte Velha do Galeão e Estrada do Galeão), em casos de engarrafamentos em suas proximidades a viagem pode sofrer atrasos.

Aqueles que optam pela utilização do transporte público para o acesso aos aeroportos, dos 22 municípios da região de estudo, todos apresentam para os dois cenários de simulação um itinerário mais ágil para o destino SBRJ. Ressaltando a variação partindo de cada bairro da sede Rio de Janeiro e a ausência de transporte público na origem Petrópolis.

Por meio dos resultados, foi possível demonstrar a aplicabilidade da metodologia proposta. Desse modo, verificou-se que as decisões dos usuários oriundos dos municípios englobados aos aeroportos neste estudo, podem ser influenciadas de acordo com o modal de transporte à disposição. Portanto, ressalta-se que no âmbito da concorrência entre SBGL e SBRJ pode estar relacionado os indicadores de acessibilidade terrestre, este domínio que em estudos futuros pode contribuir não somente para o setor acadêmico, mas também o profissional, a fim de propor inovações para as administradoras dos aeroportos com objetivo de atrair seus usuários.

Referências

ANAC (2014).
URL: *https://www.anac.gov.br/assuntos/paginastematic concedidos/galeao*

Birolini, S., Malighetti, P., Redondi, R. & Deforza, P. (2019). Access mode choice to low-cost airports: Evaluation of new direct rail services at milan-bergamo airport, Transport Policy 73, 113–124.

Braga, A. F. & Guedes, E. P. (2008). Proposta de cálculo da acessibilidade em aeroportos com o uso de sistema de informações geográficas Anais do Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Fortaleza-CE,.

Jia, P., Liu, R. & Yang, Z. (2013). An evaluation method of airport accessibility considering land-side and air-side transport system, Economic Geography 33(6), 91–97.

Moreno, M. & Muller, C. (2003). The influence of ground accessibility on airport choice in sao paulo metropolitan area Anais do 19th Dresden Conference of Traffic and Transportation Sciences, Citeseer.

Moura, F. H. S., SEVERİNO, M. R. & CAETANO, M. (2020). Airport competitiveness analysis from aircraft and passenger movement, Journal of Transportation and Logistics 5(2), 143–157.

Pasha, M. M. & Hickman, M. (2016). Airport ground accessibility: Review and assessment Anais do 38th Australasian Transport Research Forum (ATRF 2016),.

RIOgaleão (2021).
URL: *https://www.riogaleao.com/passageiros/destinos*

Rothfeld, R., Straubinger, A., Paul, A. & Antoniou, C. (2019). Analysis of european airports' access and egress travel times using google maps, Transport Policy 81, 148–162.

Integrating the maintenance process: A framework to bridge design for maintenance to prescriptive maintenance

Ashrith Jain[1,2*], Alessandro Giacotto[3], Henrique Costa Marques[3], Alberto Martinetti[1]

1. University of Twente, Design, Production, and Management Department, 7522NN Enschede, The Netherlands; a.jain-1@utwente.nl; a.martinetti@utwente.nl
2. DEAC Dutch Electric Aviation Centre Teuge, De Zanden 167, Teuge 7395 PA, The Netherlands
3. Aeronautics Institute of Technology, Logistics Engineering Laboratory, São José dos Campos, SP 12.228-900, Brazil; agiacott@ita.br; hmarques@ita.br

*** Corresponding author e-mail address**: a.jain-1@utwente.nl

PAPER ID: SIT187

ABSTRACT

Due to the rising concern over the impact of global warming and significant climate changes, the aviation industry is looking for solutions to reduce emissions. To achieve sustainable aviation, a lot of attention is being paid to the development of new aircraft designs but also retrofitting existing aircraft with the electric propulsion system. During the early design phase, the Design for Maintenance (DfM) aspect needs to be considered to facilitate ease of maintenance and safety during the operations. In this paper, the relation and impact of early design considerations on maintenance operations are presented, and a framework integrating prescriptive maintenance and DfM is proposed.

Keywords: Electric Aviation, Design for Maintenance, Aircraft Maintenance, Prescriptive Maintenance, Sustainability.

1. INTRODUCTION

The aviation industry is one of the most important transportation sectors that has a significant impact on the socio-economic development of many countries[1]. However, it is largely dependent on liquid fossil fuels with total energy consumption of up to 5%, resulting in the emission of greenhouse gases[1]. Emissions from the aviation industry, both CO_2 and non-CO_2, have a significant impact on the environment[2]. The aviation industry contributes 12% of the total CO_2 emission from the transportation sector along with SO_2, water vapor, soot, and NO_x which leads to the formation of acid rain and contrail formation[1, 2]. Along with emissions, noise near the airport areas is a challenge as it leads to potential cardiovascular diseases for the people in the close vicinity of the airport[3].

Despite the environmental impact, the aviation industry is expected to grow significantly in the coming years, with an expected annual growth rate of 5%[3][12]. Given the importance of the aviation industry and expected growth in fleet size, there is an urgent need for decarbonization to reduce emissions. These concerns coupled with the depletion of fossil fuels and rising fossil fuels are encouraging the aviation industry to move towards more sustainable solutions. According to studies, the development of bio-fuel coupled with improved aircraft technology, improved and optimized operations, and air traffic management has a greater potential to reduce emissions[4]. However, the design, development, and certification of electric aircraft are also gaining moments due to improved battery technology with higher energy density. Electrification of aircraft enables locally zero-emission, reduction in the overall maintenance cost due to less moving parts in comparison to conventional aircraft, and energy-efficient aircraft [5].

Although electrification of aircraft is gaining traction, there is a knowledge gap in terms of maintenance challenges posed by electric aircrafts and it's interaction with the airport ecosystem [45]. As presented by [6], the aviation market is characterized by very strong competition and rapid changes brought by deregulation, fast technology improvements and industry consolidation. However, despite the competition and costs raise, affordable airfares continue to be expected by passengers [6] resulting in a complex and challenging context for the airliners and as a consequence 34 airlines went out of business in 2021 alone [7]. One more challenge currently faced by the aviation industry is lack of workforce [8,9].

Given the current challenges, airlines and MRO companies that can quickly adapt will take the lead in the market arena. In this context, a new maintenance approach is needed to overcome the sustainability and work force challenges by augmenting current workforce capability and skills, lowering asset life cycle cost specially in terms of energy expenditures, while increasing asset availability: Prescriptive Maintenance (PsM) is this approach. Enabled by the surging Internet of Things (IoT) systems being developed by MROs companies and airliners, PsM is the maintenance philosophy that, through analysis of real time asset and resources data, predictive maintenance assessment and prescriptive analytics, not only provides the best maintenance strategy on what to do, when, who, why, where and how, but also optimizes the asset life cycle cost boosting operation's sustainability.

To address these challenges, it is presented in Section 4 the novel Design for PsM framework (DPMF), an evolution of the Smart Prescriptive Maintenance Framework (SPMF) proposed in the previous works [6] and [15], to bridge the gap between field lessons learned and product development while ensuring operation sustainability, efficiency and asset availability.

2. LITERATURE OVERVIEW

2.1. Significance of Maintenance Repair & Overhaul (MRO) in the aviation industry and challenges

If it is considered that, as pointed out by [14], maintenance repair and overhaul represent 20% of airline total operating costs, maintenance providers are required to constantly lower their cost share and contribute to a more reliable and sustainable aircraft operation. Although the MRO market is

forecasted to reach USD 97 billions by 2023, exceeding pre pandemic levels, pressure on maintenance cost is even stronger than before in the post covid environment since – now more than ever – airlines need to keep costs under control if they are to manage the heavy debts incurred during the crisis [13]. Yet at the same time, they must pursue their investments in more recent aircraft with lower fuel consumption and CO_2 emissions levels. Airlines are being pulled in opposite directions by the need to continue modernizing their fleets while simultaneously keeping their cash flow and budgets under tight control. Also, there is the need of fast adaptation to support different airframes to ensure business sustainability. To achieve this, as mentioned by [15], the aviation industry is continuously introducing digital technologies and upgrading its information technology [9] systems to automate the state detection of their assets and derive maintenance decisions. This remark is strengthened by [13] which reports that MRO organizations have turned more intensively on digitalization to gain efficiency, although it is a gigantic challenge due to regulation. Digitalization is expected to stabilize MRO organizations' processes by optimizing operations and workforce productivity, while reducing costs and enhancing the customer experience. This digitalization is mainly focused on predictive maintenance, augmented/virtual reality, drones, exoskeletons, and man-machine collaboration which is promising to make the work of the mechanic faster, safer, and more efficient.

Another challenge airlines and maintenance repair and overhaul (MROs) companies alike are facing is the workforce crisis, as pointed out by [8] and [9]. In fact, more than 500k technicians will be needed in the next 20 years but only 5k were certificated by the FAA in the last couple of years. Demographically, more than 60% of them are 60 years old or older and the whole workforce average age is 53 years old, which is 11 years older than the US workforce median age, meaning that the current aircraft mechanics will retire in the next 10 to 15 years [9]. On top of that, the required skills are changing faster than universities can adjust, being a challenge educating workers fast enough and provide them with skills companies need [10]. All this while the global commercial fleet will grow at an average pace of 5% a year [3][11] and the workforce size at half this pace [12]. Still according to [9], the shortage of labor may drive up maintenance costs for airlines and increase turnaround times for scheduled maintenance; a potentially devastating blow for the industry, as many airlines already struggle to keep profitability at a reasonable level due to low-cost tickets [6]. As indicated previously by [10], the workforce shortage is due in part to an aging global population. But this is far from being the only issue: attracting new talent to the MRO industry is proving to be difficult, in fact, up to 30% of those who finish an aviation maintenance training course end up working in another industry, so competition for talent is also an issue [12]. All in all, in a post covid environment airline and MROs organizations are not able to hire fast enough to keep up with travel demand [13].

2.2. Maintenance concepts overview

In general, maintenance is defined as the combination of all technical and administrative actions, which ensure that a system is in its required functioning state, and it is related to actions such as repairing, replacing, overhauling, inspecting, servicing, adjusting, testing, measuring and detecting faults [18].

Maintenance is classified according to 3 strategies [19]:

1) Management based strategies:

Total Production Maintenance (TPM): it is maintenance activities that are productive and implemented by all employees, from senior management to operators encompassing all organization's department. It has 5 pillars namely, improving equipment effectiveness, improving maintenance equipment and effectiveness, ensure early equipment management and maintenance prevention, provide training to all people involved, involve operators in routine maintenance [19].

Total Life Cycle Cost Strategy (TLC): it is a systemic approach of managing the maintenance of a system from inception to

disposal. The Program Manager is the single point of accountability for accomplishing program objectives for TLCSM. Consequently, the PM is responsible for the implementation, management, and/or oversight of activities associated with the system's development, production, fielding, sustainment, and disposal [20].

Reliability Cantered Maintenance (RCM): it has four main pillars, namely, preserve functions, identify failure mode that can defeat the functions, prioritize functions need (via the failure modes), select only applicable and effective preventive maintenance tasks [21].

2) Strategies with no sensing and computing technologies:

Run to failure strategies: it is a maintenance strategy where maintenance is performed after equipment failure. Unlike reactive maintenance, run to failure maintenance is adopted deliberately for some assets to which would be too costly the adoption of a proactive or preventive strategy [18].

Preventive maintenance (PM): it was introduced in the 1950s, after the recognition of the need to prevent failure, PM has been adopted for more complex than those based on the use of hand tools that are usually maintained through run to failure strategy. The basic principle of a PM system is that it involves predetermined maintenance tasks that are derived from machine or equipment functionalities and component lifetimes. Accordingly, tasks are planned to change components before they fail and are scheduled during machine stoppages or shutdown.

Proactive maintenance: all forms of maintenance that include regular functionality checks to either identify upcoming faults or project failures prior to their occurrence are defined to be proactive [14].

3) Strategies with sensing and computing technologies:

Condition bases maintenance (CBM): it is a maintenance strategy that monitors the actual condition of an asset to decide what maintenance needs to be done. Based on the concept of Remaining Useful Life (RUL), CBM dictates that maintenance can only be performed when certain indicators show signs of decreasing performance or upcoming failure. Checking a machine for these indicators may include non-invasive measurements, visual inspection, performance data and scheduled tests. Condition data can then be gathered at certain intervals, or continuously (as it is done when a machine has internal sensors). CBM can be applied to mission critical and non-mission critical assets [23].

Predictive Maintenance: by using the knowledge about degradation mechanism, extends the degradation propagation into the future to project system failures. Basically, this approach combines insights coming from the observation of experienced degradation with anticipated operating loads in the future in order to predict when the asset will fail and support the maintenance decision making process [14].

Prescriptive maintenance: this approach utilizes the information about degradation projections and extend the scope of the maintenance decision making process beyond the asset itself [14] considering maintenance teams, tools, shop repairs capabilities, spare logistics and the operation [6]. By considering the surrounding ecosystem, a PsM strategy allows a level of holistic analysis [28] and optimization of maintenance measures [14] that simply can't be achieved through other maintenance strategies.
If predictive maintenance says when the failure will happen, PsM informs what maintenance actions should be taken, when, where, by who, how and why aiming the overall maintenance optimization and ensuring operations performances are met [14][6].

Although PsM is an holistic maintenance strategy [28] and it has been appointed that engineering design improvement based on derived insights from PsM framework should be provided [45], no mentions or implementation propositions about how to influence design are found in the related literature [6][14][15][29]-[43], gap that is addressed in this paper.

2.3. Electric aviation overview

Currently, there is a lot of research and development being carried out by companies and research centers on the electrification of aircraft, improved battery systems, propulsion systems, and aircraft configurations [16]. A study carried out by Hepperle [17] discussed the potentials and limitations of electric aircraft by comparing different propulsion system architectures and proposed modifications to improve the aircraft performance with the available battery technologies. The success of the Electric propulsion system depends on the battery performance, battery safety, power density, power electronics, and light and safe high voltage distribution system [5]. The electric propulsion system can be classified based on the degree of hybridization into All-Electric, Hybrid Electric, and Turboelectric propulsion system [5]. All-electric aircraft draw the required energy for the flight from the batteries and it relies on the weight and the battery storage capacity. Given the lack of energy density, it is suitable for short-distance flights is limited payload capacity. Some examples of All Electric aircraft are Airbus E-fan and Pipistrel Velvis Electro [16]. Hybrid Electric aircraft uses the benefit of integration of turbo engine into the propulsion system and enables various levels of hybridization and configurations such as parallel hybrid, series hybrid, and series/parallel hybrid[5]. A study was carried out by Karpuk. et.al., [16] made an overview of the current developments in the field of electric aviation that included simulation techniques, the effect of Hybrid Electric aircraft from an operational perspective, sizing methodologies, new aircraft architectures, and current technologies.

Along with innovative new design such a Eviation Alice, a 9-seater fully electric aircrafts, research is also being carried out on retrofitting of existing aircrafts by changing the propulsion system. In a study [46], both retrofitting and new design of electric aircraft were analyzed to understand and evaluate the over all performance. Given the number of existing aircrafts, specially in general aviation, retrofitting is a feasible way to proceed. In terms of majority of the hazards, electric aircrafts are comparable to conventional aircraft and it is possible to mitigate them under current regulations [47].

Currently, a lot of attention is paid for the technical aspect and performance characteristics of an electric aircraft and not much work is being carried out on the future maintenance work [45]. In a study [45], maintenance personnel expressed their concerns of the over the maintenance of the high voltage battery and recommended to emphasize on the design for maintainability aspect.

DESIGN FOR MAINTENANCE (DFM) AND ITS INFLUENCE ON THE MAINTENANCE OPERATION

The design of a product influences the asset performance throughout the life cycle and cost effectiveness [24]. The design for Maintenance (DfM) approach helps in optimizing the product performance ad future maintenance efforts. It comprises Supportability, Maintainability, and Reliability. Maintainability is how easily, quickly, and safely an asset can be maintained, reliability of an asset is the ability to perform intended functions without breakdowns for a longer period, and supportability is the ability to perform maintenance with minimum cost and time. DfM influences the availability of the product, which in turn influences cost-effectiveness [24]. DfM must be deployed in the early phases of product development so that it is easier to have an overview of the tools and resources required, the life cycle of the system components used in the system, and also the maintenance time required to keep the system up and running [24]. Mulder et.al., [24] have formulated guidelines to enhance the maintainability, supportability, and reliability of an asset.

DfM plays a crucial role in the maintenance of the asset through the life cycle, it is important to keep the availability at the maximum while keeping the overall life cycle cost low in the aviation industry. System failure is inevitable despite ensuring a higher degree of reliability of an asset, the ability to

restore it in an event of failure is crucial. Hence, maintainability is one of the most vital systems design parameters to ensure the availability of a product [25]. Critical maintainability attributes that are related to the maintenance process are simplicity, modularity, standardization, diagnosability, and identification, whereas accessibility, assembly/disassembly, ergonomics, and maintenance safety are mainly related to the maintenance activity [26]. As the maintainability attributes are correlated to the maintenance activity and maintenance procedure, it is important to reflect on an early design stages [26]. In the study [25], need for DfM is laid out with the help of a mind map emphasizing on DfM of electric aircrafts but also on the interaction with airport ecosystem, certification, and maintenance training. In order to improve a design, there must be a feedback based on the maintenance procedure carried out.

3. PROPOSED FRAMEWORK: DESIGN FOR MAINTENANCE AND PRESCRIPTIVE MAINTEANANCE

The main aim of PsM is to understand and identify what is wrong with an asset and provide guidance in performing maintenance actions. This enables an easier and more efficient maintenance process for a given asset. However, PsM has the potential to monitor the maintenance action and collect the data required for design improvement that can future improve the overall maintenance process and reduce the life cycle cost. In this study, a proposition to integrate the PsM framework with the DfM framework (Fig.1) is presented to enable the asset manufacturer to make necessary design improvements to enhance availability and improve safety. The SPMF, introduced in Marques [6], was developed and tested on study case presented in Giacotto [15]. This framework is adapted to assembly line constituted by robots and production machines, an operating environment that requires certain production levels, and a maintenance capability constituted by maintenance workforce, tooling, tribal knowledge, and infrastructure suitable for the implementation of the SPMF. The SPMF is built on three pillars.

1. The system's Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) factors;
2. The operating environment;
3. The organization's maintenance capabilities [6].

Time is considered during the maintenance schedule in alignment to de Mello [27] and maintenance cost is considered as objective function according to the model proposed by [28] which takes into account the optimal cost (direct and indirect costs) instead of minimum direct cost. This optimal cost encompasses maintenance direct costs (workforce and material), operational irregularity costs, cost of waste-of-life caused by premature maintenance tasks implementation and sustainability costs which measures CO_2 emissions caused by maintenance [14]. The framework presented in figure 1 was built considering the three SPMF's domains and an implementation in a business case described by Giacotto [15]:

1. RAMS information is represented by the technical publications, manuals, specs, maintenance plan, and the data gathered from the condition monitoring;
2. The operating environment and requirements are defined by the production demand, robots, tools, and workforce; and
3. The organization's maintenance capabilities are described by the

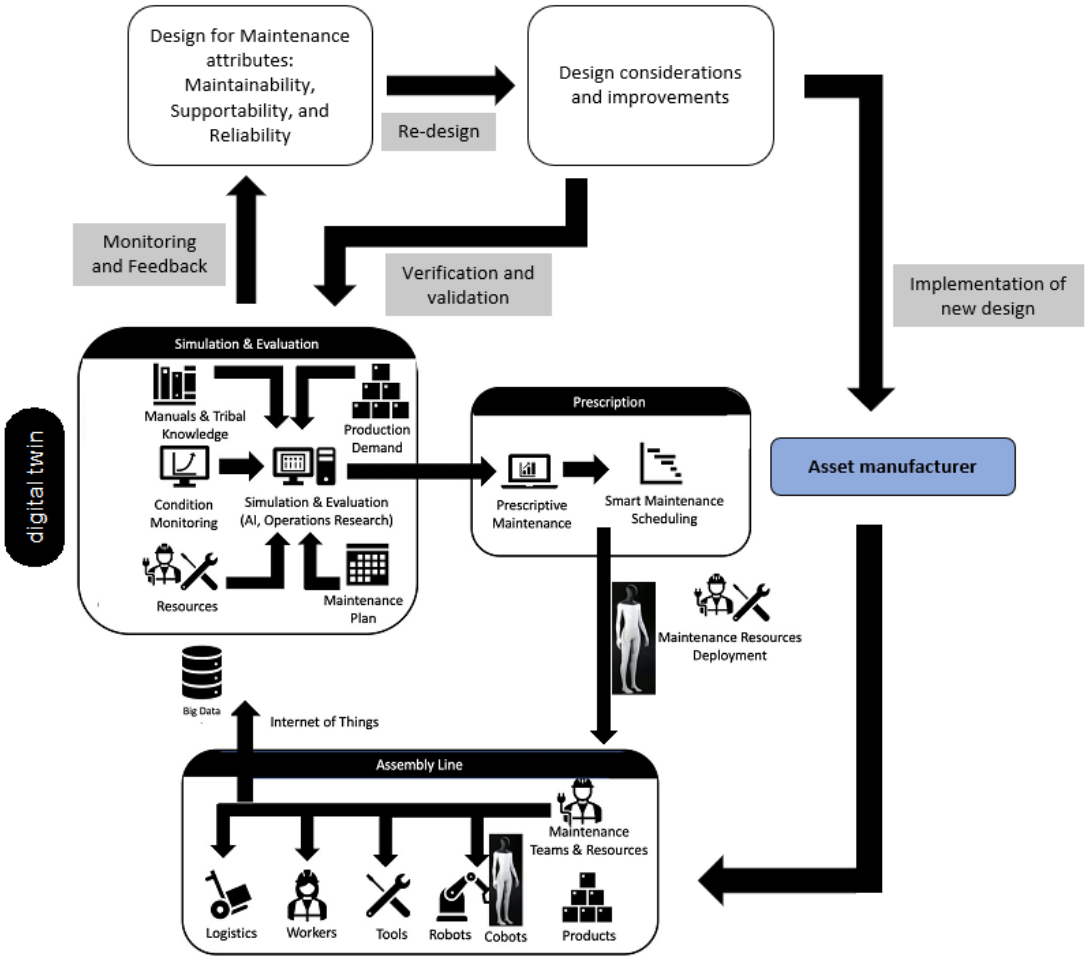


Figure 1: Fig.1. Integration of prescriptive maintenance strategy and Design for Maintenance approach (Design for Prescriptive Maintenance Framework

maintenance resources such as tools, labour available, and maintenance tribal knowledge.

Through IoT infrastructure, real time data is collected about

- Assets' availability, performance, and usage
- Resources availability
- Product quality

Successively, the information is consolidated and used in the simulation and evaluation stage to generate PsM recommendations by optimizing total cost while ensuring operational and maintenance requirements and constraints. The information considered by the simulation algorithm within the SPMF's framework is listed below [15]:

- Maintenance manual and plan
- maintenance team's "tribal" knowledge;
- Equipment condition monitoring to support Prognostics and Health Management, including Remaining Useful Life (RUL) evaluation;
- Available resources such as maintenance labor and tools;
- Production requiremen

Necessary DfM attributes and key performance indicators (KPIs) are monitored using a feedback loop from the framework that helps in formulating design considerations and improvements in the asset. Once the re-design ideas are generated, it is sent back into simulation for verification and validation. This is an iterative process which is carried out until a new design with improved maintainability, reliability, and supportability is generated,

which is then implemented by the asset manufacturer. This enables the use of real-life and related scenarios to test the improved design before being implemented. For instance, when a PsM algorithm dictates what must be done in case of a failure, the KPI such as Mean Time To Repair (MTTR) is being monitored and registered. This information is then evaluated against the maintainability attributes and the scope for design improvements is identified. Improved design is then verified and validated using simulations and evaluation tools like digital mock-ups to see if there is a decrease in MTTR. This process is repeated until an optimized MTTR is achieved and the information with the new design is relayed to the asset manufacturer.

4. CONCLUSION

The paper presents the novel Design for PsM Framework (DPMF) which adds design for maintenance processes and techniques to the previously proposed SPMF. The framework addresses the workforce and sustainability challenges adopting total maintenance cost as objective function, maintenance resources and operation requirements as constraints, and using the simulation environment already provided by the SPMF to evaluate the OEM design improvements effects over the maintenance processes, availability and total costs. Once the design modifications are successfully tested and their effects evaluated, the OEM implements them on the assets. As the electric aviation is gaining a lot of traction and lack of knowledge on the future maintenance implies that there is a lot to learn and improve, correlating DfM and PsM. The future work will be focused in developing the experiment in the aeronautical and health industry to evaluate extensibility and viability of the framework.

5. AKNOWLEDGEMENTS

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

References

[1] Baroutaji, A., et al. (2019), *Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors.* 106: p. 31-40. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3945107

[2] Lee, D.S., et al. (2021), *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018.* 244: p. 117834. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022

[3] Qiu, R., et al. (2021), *Green aviation industry sustainable development towards an integrated support system.* 30(5): p. 2441-2452. https://doi.org/10.1002/bse.2756

[4] Abrantes, I., et al.(2021), *Sustainable aviation fuels and imminent technologies-CO2 emissions evolution towards 2050.* 313: p. 127937. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127937

[5] Tom, L., et al. (2021), *Commercial Aircraft Electrification—Current State and Future Scope.* 14(24): p. 8381. https://doi.org/10.3390/en14248381

[6] Marques, H., & Giacotto, A. (2019). *Prescriptive Maintenance: Building Alternative Plans for Smart Operations.* 231–236. https://doi.org/10.3384/ecp19162027

[7] PWC (2021). P*rice Waterhouse Coopers. Global Aerospace and Defense Annual Industry Performance Outlook.* Retrieved August 15, 2022, from www.pwc.com/us/aerospaceanddefense

[8] Aviation Week (2021). *MRO workforce crisis looms as aviation begins pandemic recovery*. Retrieved August 15, 2022, from https://aviationweek.com/mro/workforce-training/mro-workforce-crisis-

looms-aviation-begins-pandemic-recovery

[9] Satair (2019). *Why are there concerns about MRO labour capacity in Aviation?* Retrieved August 15, 2022 from https://blog.satair.com/corncerns-mro-labour-capacity

[10] Campbell, B., (2017). *The Aviation MRO Workforce Crisis.* Retrieved August 15, 2022 from https://www.linkedin.com/pulse/aviation-mro-workforce-crisis-brendan-campbell

[11] Brinknews (2022). *Airline Fleets Are Back in Growth Mode with a Focus on Sustainability.* Retrieved August 15, 2022 from https://www.brinknews.com/aviation-fleets-are-back-in-growth-mode-with-a-focus-on-sustainability/

[12] Atec-amt (2018). *The 2019-2020 pipeline report.* Retrieved August 15, 2022 from https://www.atec-amt.org/2019-2020-pipeline-report.html

[13] Aviationbusinessnews.com (2021). *MRO Global Outlook 2022*. Volume 23, Issue 6. Retrieved August 15, 2022 from https://www.aviationbusinessnews.com/mro/latest-news-mro/mro-global-market-outlook-2022-special-report/

[14] Meissner, R., Rahn, A., & Wicke, K. (2021). Developing prescriptive maintenance strategies in the aviation industry based on a discrete-event simulation framework for post-prognostics decision making. *Reliability Engineering & System Safety, 214, 107812.* https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107812

[15] Giacotto, A., Costa Marques, H., Pereira Barreto, E. A., & Martinetti, A. (2021). The Need for Ecosystem 4.0 to Support Maintenance 4.0: An Aviation Assembly Line Case. *Applied Sciences*, *11*(8), 3333. https://doi.org/10.3390/app11083333

[16] Karpuk, S. and A.J.A. Elham. (2021). Influence of novel airframe technologies on the feasibility of fully-electric regional aviation. **8**(6): p. 163.

[17] Hepperle, M. (2012). Electric flight-potential and limitations.

[18] Illyani, B.; Razak, A., Hamimi, I.; Ab-Samat, Hasnida, A.; Shahrul, K., (2017). Preventive Maintenance (PM) planning: a review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 23(2), JQME-04-2016-0014.* doi:10.1108/JQME-04-2016-0014

[19] Wireman, T. (2004). Total Productive Maintenance. *Industrial Press*. Retrieved August 16, 2022 from https://books.google.com.br/books?id=UfKRG56P1-QC.

[20] Acqnotes (2021). *Total Life Cycle Systems Management (TLCSM).* Retrieved August 16, 2022 from https://acqnotes.com/acqnote/careerfields/total-life-cycle-systems-management-tlcsm

[21] Smith, A. (2003). Reliability-Centered Maintenance. *Elsevier.* Retrieved August 16, 2022 from https://books.google.com.br/books?id=BnQN2ODPHNAC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

[22] Dutschke J. (2022). Run to failure: make it part of your maintenance planning. Retrieved August 16, 2022 from https://www.fiixsoftware.com/blog/run-failure-make-part-maintenance-planning/

[23] Fiix Software (2022). Condition Based Maintenance (CBM). Retrieved August 16, 2022 from https://www.fiixsoftware.com/maintenance-strategies/condition-based-maintenance/

[24] Mulder, W., et al., (2012). Design for maintenance: guidelines to enhance maintainability, reliability and supportability of industrial products. ISBN 978-94-6190-993-0

[25] Jain, A., A. Martinetti, and L.J.A.a.S. van Dongen (2021). Mapping the Needs of Design for Maintenance in Electric Aviation. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3945107

[26] Luo, X., et al. (2021). A method for the maintainability evaluation at design stage using maintainability design attributes. 210: p. 107535. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107535

[27] de Mello, J.M.G.; Trabasso, L.G.; Reckevcius, A.C.; Palmeira, A.L.O.A.; Reiss, P.; Caraca, W. (2020). A Novel Jigless Process Applied to a Robotic Cell for Aircraft Structural Assembly. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020, 109, 1177–1187

[28] Choubey, S., Benton, R. G., & Johnsten, T. (2020). A Holistic End-to-End Prescriptive Maintenance Framework. *Data-Enabled Discovery and Applications*, *4*(1), 11. https://doi.org/10.1007/s41688-020-00045-z

[29] Meissner, R., Meyer, H., & Wicke, K. (2021). Concept and Economic Evaluation of Prescriptive Maintenance Strategies for an Automated Condition Monitoring System. *International Journal of Prognostics and Health Management*, *12*(3). https://doi.org/10.36001/ijphm.2021.v12i3.2911

[30] Wesendrup, K., & Hellingrath, B. (2022). A Prescriptive Maintenance Aligned Production Planning and Control Reference Process. *ECIS 2022*, 20.

[31] Vanderschueren, T., Boute, R., Verdonck, T., Baesens, B., & Verbeke, W. (2022). *Prescriptive maintenance with causal machine learning* (arXiv:2206.01562). arXiv. http://arxiv.org/abs/2206.01562

[32] Strack, B., Frank, J., Stich, V., Lenart, M., Pfau, F., 2022. Sociotechnical Implementation of Prescriptive Maintenance for Onshore Wind Turbines. *Hawaii International Conference on System Sciences.* https://doi.org/10.24251/HICSS.2022.158

[33] Koukaras, P., Dimara, A., Herrera, S., Zangrando, N., Krinidis, S., Ioannidis, D., Fraternali, P., Tjortjis, C., Anagnostopoulos, C.-N., & Tzovaras, D. (2022). Proactive Buildings: A Prescriptive Maintenance Approach. In I. Maglogiannis, L. Iliadis, J. Macintyre, & P. Cortez (Eds.), *Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2022 IFIP WG 12.5 International Workshops* (Vol. 652, pp. 289–300). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08341-9_24

[34] Fox, H., Pillai, A. C., Friedrich, D., Collu, M., Dawood, T., & Johanning, L. (2022). A Review of Predictive and Prescriptive Offshore Wind Farm Operation and Maintenance. *Energies*, *15*(2), 504. https://doi.org/10.3390/en15020504

[35] Cho, A. D., Carrasco, R. A., & Ruz, G. A. (2022). Improving Prescriptive Maintenance by Incorporating Post-Prognostic Information Through Chance Constraints. *IEEE Access*, *10*, 55924–55932. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3177537

[36] Strack, B., Frank, J., Stich, V., & Pfau, F. (2021). Prescriptive Maintenance for Onshore Wind Turbines. *2nd Conference on Production Systems and Logistics.* https://doi.org/10.15488/11282

[37] Padovano, A., Longo, F., Nicoletti, L., Gazzaneo, L., Chiurco, A., & Talarico, S. (2021). A prescriptive maintenance system for intelligent production planning and control in a smart cyber-physical production line. *Procedia CIRP*, *104*, 1819–1824.

https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.307

[38] Goetz, W. (2017). The path to prescriptive maintenance: Three steps to drive reliability while preparing for IIoT. *Gale Academic OneFile*, *71*(4), 26

[39] Hoshafian, D. S., & Rostetter, C. (2015). Disrupting Manufacturing Value Streams through Internet of Things, Big Data, and Dynamic Case Management. *PEGA*, 20.

[40] Nemeth, T., Ansari, F., Sihn, W., Haslhofer, B., & Schindler, A. (2018). PriMa-X: A reference model for realizing prescriptive maintenance and assessing its maturity enhanced by machine learning. *Procedia CIRP*, *72*, 1039–1044. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.280

[41] Ansari, F., Glawar, R., & Nemeth, T. (2019). PriMa: A prescriptive maintenance model for cyber-physical production systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *32*(4–5), 482–503. https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571236

[42] Consilvio, A., Sanetti, P., Anguita, D., Crovetto, C., Dambra, C., Oneto, L., Papa, F., & Sacco, N. (2019). Prescriptive Maintenance of Railway Infrastructure: From Data Analytics to Decision Support. *2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 1–10. https://doi.org/10.1109/MTITS.2019.8883331

[43] Ansari, F., Glawar, R., & Sihn, W. (2020). Prescriptive Maintenance of CPPS by Integrating Multimodal Data with Dynamic Bayesian Networks. In J. Beyerer, A. Maier, & O. Niggemann (Eds.), *Machine Learning for Cyber Physical Systems* (Vol. 11, pp. 1–8). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59084-3_1

[44] Koops, L. (2020). Optimized Maintenance Decision-Making – A Simulation-supported Prescriptive Analytics Approach based on Probabilistic Cost-Benefit Analysis. *Proceedings of the Virtual European Conference of the Prognostics and Health Management Society*, 15.

[45] Naru, R., & German, B. (2018). Maintenance Considerations for Electric Aircraft and Feedback from Aircraft Maintenance Technicians. *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* (p. 3053). https://doi.org/10.2514/6.2018-3053

[46] Liu, Y., Wang, H., Zhang, J., Jiang, T., & Zheng, Y. (2021, August). Retrofit and New Design of Regional Aircraft with Hybrid Electric Propulsion. *AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)* (pp. 1-12). IEEE. https://doi.org/10.23919/EATS52162.2021.9704854

[47] Courtin, C., & Hansman, R. J. (2018). Safety considerations in emerging electric aircraft architectures. *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* (p. 4149). https://doi.org/10.2514/6.2018-4149

ANÁLISE DOS FATORES DE ESCOLHA DE MOBILIDADE AÉREA URBANA PARA O ACESSO AO AEROPORTO

Carolina Silva Ansélmo, Giovanna Miceli Ronzani Borille, Flavia Renata Dantas Alves Silva Ciaccia, Wallace Silva Sant'Anna Souza
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

*** Corresponding author e-mail address**: carolina@ita.br

PAPER ID: SIT172

ABSTRACT

Urban Air Mobility (UAM) is a new novel concept of mobility that uses Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOLs) aircraft to transport people and cargo in urban areas in a fast, safe, efficient, and affordable way. Among the challenges of implementing the UAM, public perception is a key feature since it helps to identify factors that will impact directly the demand, such as user preferences, interests, and concerns. The literature identifies that airport shuttle is a potential market for the UAM since it offers a potentially better travel experience, at a reduced time, and acceptable cost while avoiding car traffic. However, there are still gaps in the research about the user's priorities when selecting the UAM flight that best fits his interest. Therefore, the present study proposes an approach with Conjoint Analysis to quantify the decision variables that future potential UAM Brazilian users will use as a reference to select between available flights. To that end, we applied an online questionnaire to establish each respondent's ranking of preferences from some permutations of travel cost, flight time, type of aircraft control (pilot or automatic system), and proximity to the departure area. The sample collected was mostly from the southeastern region of Brazil. The results showed that cost was the main variable that influenced the respondent's decisions (57,26%), followed by flight time with 23,90%. The type of aircraft control only influenced the decision-making process by 6,78%, which implies a tendency to accept new technologies if it implies cheaper flights.
Keywords: Urban Air Mobility, Airport Access, Conjoint Analysis.

RESUMO

Mobilidade Aérea Urbana (UAM) é um novo conceito de mobilidade que usa aeronaves de decolagem e aterrissagem verticais elétricas (eVTOLs) para transportar pessoas e cargas em áreas urbanas de forma rápida, segura, eficiente e acessível. Entre os desafios da implementação da UAM, a percepção do público é um ponto fundamental, pois ajuda a identificar fatores que impactarão diretamente a demanda, como preferências, interesses e preocupações dos usuários. A literatura identifica que o acesso ao aeroporto é um mercado potencial para a UAM, uma vez que oferece uma experiência de viagem potencialmente melhor, em um tempo reduzido e custo aceitável, evitando o tráfego de automóveis. No entanto, ainda existem lacunas sobre as prioridades do usuário na hora de selecionar o voo UAM que melhor se adequa ao seu interesse. Portanto, o presente estudo propõe uma abordagem com Análise Conjunta para quantificar as variáveis de decisão que futuros potenciais usuários brasileiros de UAM utilizarão como referência para selecionar entre os voos disponíveis. Para tanto, aplicamos um questionário online para estabelecer o *ranking* de preferências de cada respondente a partir de algumas permutações de custo de viagem, tempo de voo, tipo de controle da aeronave (piloto ou sistema automático) e proximidade da área de embarque (baldeação). A amostra coletada foi majoritariamente da região sudeste do Brasil. Os resultados mostraram que o custo foi a principal variável que influenciou as decisões do respondente (57,26%), seguido do tempo de voo com 23,90%. O tipo de controle da aeronave só influenciou o processo decisório em 6,78%, o que implica uma tendência a aceitar novas tecnologias se implicar em voos mais baratos.
Palavras-chave: Mobilidade Aérea Urbana, Acesso ao Aeroporto, Análise Conjunta.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

1. INTRODUÇÃO

A Mobilidade Aérea Urbana (UAM) pode ser definida como um sistema de transporte aéreo intermunicipal e intramunicipal, para passageiros, cargas e emergências médicas de modo seguro, eficiente e acessível (Shaheen *et al.*, 2020). É um tema que vem ganhando destaque na indústria e na academia, principalmente para aeronaves com Decolagem e Pouso Vertical, do inglês *Vertical Take-Off and Landing* (VTOL) (Straubinger *et al.*, 2020b).

A UAM pode reduzir problemas urbanos como engarrafamentos, tempo de deslocamento e custos, pois permite o transporte em áreas densamente povoadas em um curto espaço de tempo (Shaheen *et al.*, 2017). A proposta é oferecer serviços ágeis, seguros, confiáveis e menos estressantes (AIRBUS, 2017).

Pelo caráter emergente da tecnologia, compreender as barreiras sociais à aceitação e adoção da UAM pode auxiliar na identificação das oportunidades de mercado, modelos de negócios e parcerias. Além disso, pode prever possíveis padrões de oferta e demanda e orientar futuras políticas públicas que maximizem os benefícios e mitiguem as possíveis adversidades (NASA, 2018). Logo, o conhecimento sobre a percepção, aceitação e adoção da UAM são pontos essenciais para obtenção de sucesso na implementação do serviço (Wu & Zhang, 2021).

Dentre os estudos publicados sobre UAM, têm-se a avaliação de seu potencial de mercado (NASA, 2018), a identificação das barreiras para sua implementação (NASA, 2019), demanda e preferência (Fu *et al.*, 2019), fatores para adoção e uso (Haddad *et al.*, 2020), percepções de tempo, uso e desafios ambientais (Eker *et al.*, 2020), disposição a pagar por UAM (Winter *et al.*, 2020), previsão de demanda (Rajendran *et al.*, 2021), usuário potencial (Haan *et al.*, 2021), entre outros.

O presente trabalho pretende contribuir com a literatura ao quantificar a importância relativa das variáveis custo, tempo de trajeto, presença de piloto e necessidade de baldeação na contratação do serviço de UAM para acesso a um aeroporto no Brasil. Para tal, aplicamos a técnica de Análise Conjunta dentro de cenários de ofertas de voo da UAM considerando uma rota fixa de operação.

O artigo divide-se em (i) revisão de literatura, (ii) metodologia, (iii) resultados e discussão e (iv) conclusões.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Um fator importante para a introdução da UAM é a aceitação pública, considerando o impacto nos usuários e não usuários (AIRBUS, 2019). A aceitação do usuário pode ser definida como a intenção de utilizar um novo sistema (Bernhard *et al.*, 2020), ou seja, a vontade de um grupo de empregar uma tecnologia com o objetivo proposto pela mesma (Dillon & Morris, 1996).

Segundo Haddad *et al.* (2020), os fatores que influenciam na adoção da UAM são economia de tempo, custo, percepção, segurança, confiança, afinidade com automação, preocupação com dados pessoais, atitudes pessoais e perfis sociodemográficos. Os fatores que favorecem o uso do UAM são usuários acostumados com automação, serviços *online*, redes sociais e compartilhamento. Por outro lado, segurança dos dados pessoais, preocupação ambiental e insegurança impactam negativamente.

As pesquisas de Straubinger *et al.* (2020a), concordam que o tempo e os custos de viagem são fatores de grande importância para a UAM, além de acrescentarem os fatores de tempo de acesso/tempo de espera, valor do tempo e segurança. Apontam ainda os fatores de média importância: conforto, flexibilidade, automação, disposição para compartilhamento, motivo e distância da viagem.

Com base na literatura e entrevistas com especialistas, a EASA (2021) identificou que os principais problemas associados a implantação da UAM na Europa serão: (i) ruído na decolagem, voo e aterrisagem (ii) segurança, (iii) privacidade, (iii) poluição visual, (iv) perda de trabalho, (v) questões ambientais de eletricidade e componentes fabricados e (vi) acessibilidade.

As variáveis analisadas nos estudos de UAM podem ser divididas em quatro categorias (i) informações sociodemográficas, (ii) atitudes sociais, (iii) padrões de mobilidade atuais e (iv) questões relacionadas a UAM (Fu *et al.*, 2019, Haddad *et al.*, 2020, Eker *et al.*, 2020, Winter *et al.*, 2020, Rajendran *et al.*, 2021, Haan *et al.*, 2021, Ahmed *et al.*, 2021).

Em relação as variáveis sociodemográficas, Fu *et al.* (2019) concluíram que indivíduos mais jovens (18 a 35 anos) e indivíduos mais velhos de alta renda são mais propensos a usar UAM, com foco em viagens não cotidianas desde o início das operações. Haddad *et al.* (2020) concordam com a renda, pois concluíram que os grupos mais propensos a usar o UAM em um primeiro momento são os indivíduos empregados em tempo integral com renda mais alta. Isso pode ser explicado pela tendência de pagar mais por novas tecnologias e pelas preocupações ambientais. Por outro lado, indivíduos entre 46 e 65 anos são menos propensos a aceitar a UAM (Fu *et al*., 2019).

Em relação ao gênero, não houve diferença entre homens e mulheres para Fu *et al.* (2019), mas para Haddad *et al.* (2020) as mulheres estavam menos interessadas no uso imediato, com menor confiança e utilidade de adoção percebida. Ainda sobre este grupo, há maior preocupação com segurança, proteção e expectativas que os operadores empreguem câmeras de segurança no veículo.

Analisando o nível educacional, indivíduos com nível educacional abaixo do bacharel e com renda mais baixa tendem a aceitar menos a UAM. Assim como os indivíduos com filhos e rendas altas tendem a ser menos favoráveis quando comparadas aos indivíduos sem filhos nas mesmas condições (Fu *et al*., 2019).

Em relação aos padrões de mobilidade atuais, os usuários que utilizam transporte público, caminham ou utilizam bicicletas são menos propensos a aceitar automação em veículos, sejam veículos terrestres ou aéreos, principalmente devido ao menor padrão de renda. Assim como os indivíduos que não possuem veículo próprio são menos propensos a aceitar automação. Para viagens cotidianas, o táxi aéreo autônomo (UAM) ocupa o último lugar em preferência no estudo de caso de Munique com as opções de escolha veículo, veículo autônomo, transporte público e UAM (Fu *et al*, 2019).

Segundo os entrevistados de Haddad *et al.* (2020), o fator segurança foi o fator mais relevante, seguido de custos de viagens, duração da viagem, confiabilidade e operação do serviço. A afinidade com a automação mostrou-se positiva para adoção imediata da UAM. Por outro lado, economia de tempo e preço influenciaram na adoção tardia do UAM, o que pode ser um achado contraintuitivo, mas pode indicar ceticismo por parte dos entrevistados em relação ao tempo de funcionamento e por esperarem que o preço diminua com o tempo. Preocupações sobre compartilhamento de dados e segurança cibernética e perda de emprego pela automação dificultam a adoção imediata. O uso de redes sociais e WhatsApp (aplicativo de troca de mensagens) foram indicativos positivos para a aceitação da UAM.

A Tabela 1 resume os principais trabalhos abordados com seus objetivos, metodologias e variáveis utilizadas.

Dado o exposto, o presente estudo visa utilizar a técnica de Análise Conjunta para quantificar a importância relativa das variáveis custo, tempo de trajeto, presença de piloto e necessidade de baldeação, considerando cenários de UAM para acessar um aeroporto brasileiro.

A Análise Conjunta é um tipo de Preferência Declarada (Walter *et al.*, 2011). Baseia-se na teoria da utilidade, que descreve e explica o comportamento do cliente. De acordo com a teoria da utilidade, o cliente tende a decidir por um serviço ou produto buscando o benefício máximo (Luce & Turquia, 1964; Kranz & Tversky, 1971). O objetivo é identificar preferências em relação às variáveis analisadas e medir a contribuição de cada uma (Kowalska-Pyzalska, 2022). Exemplos de aplicação são a análise de demanda por ônibus expresso (Walter *et al.*, 20211), aceitação pública de ônibus sem condutor (Papadima *et al.*, 2020), fatores que influenciam na escolha de veículos movidos a combustíveis alternativos (Kowalska & Pyzalska *et al*., 2022), entre outros estudos.

3. METODOLOGIA

A técnica de Análise Conjunta (*Conjoint Analysis*) tradicional foi selecionada, porque é um método estatístico que é aderente ao objetivo da pesquisa, isto é, investigar a importância relativa das variáveis supracitadas. Além disso, essa técnica possui por característica exigir um menor universo amostral (a partir de 50 respondentes), pois permite a análise de perfis completos de uma vez (Hair *et al*., 2009).

O primeiro passo foi definir os atributos e níveis para cada atributo. Foi tomado o cuidado

Tabela 1 Tabela Sinótica da Revisão de Literatura

Autor(es) (ano)	Objetivos	Metodologia	Variáveis
Fu *et al.* (2019)	Identificar a demanda futura e a preferência entre (i) carro particular, (ii) transporte público, (iii) táxi autônomo e (iv) táxi aéreo autônomo (UAM)	• Pesquisa *online* • Preferência Declarada • Modelo *logit* multinomial de escolha de modo	• Padrões de mobilidade atuais • Sociodemográfico
Haddad *et al.* (2020)	Identificar e qualificar os fatores sobre adoção e uso do UAM ao longo do tempo	• Pesquisa *online* (Limesurvey Pro, Facebook, Instagram, listas de discussão) • Preferência Declarada • Classificação • Análise Fatorial Exploratória • Estimativa de Probabilidade Máxima • Método Kaiser-Guttman • Modelos de escolha discreta • Modelos *logi*t multinomiais • Modelos de *logit* ordenados	• Comportamento de viagem • Sociodemográfico • Cenários • Utilidade percebida • Fatores ao adotar e usar o UAM • Atitudes sociais
Eker *et al.* (2020)	Identificar percepções sobre tempo de viagem, custos, questões ambientais e desafios da UAM	• Pesquisa *online* na plataforma "SurveyMonkey" • Teoria do comportamento planejado • Modelo probit bivariado	• Sociodemográfico • Cenários • Adoção de "carros voadores" • Benefícios e preocupações sobre "carros voadores" • Familiaridade dos indivíduos com sistemas avançados de assistência ao motorista
Winter *et al.* (2020)	Identificar fatores significativos para a disposição de utilizar UAM autônomo	• Pesquisa *online* • Regressão	• Sociodemográfico • Percepção de complexidade, familiaridade, valor, diversão e cautela de novas tecnologia
Rajendran *et al.* (2021)	Prever a demanda para UAM em vários horários do dia e regiões	• Regressão logística • Redes neurais artificiais • Florestas aleatórias • Aumento de gradiente	• Mês, dia e hora • Temperatura, condições climáticas e visibilidade
Haan *et al.* (2021)	Identificar o uso potencial do UAM	• Pesquisa de Preferência Declarada • Modelo de Escolha de Modo	• Dados do telefone celular • Dados de censo • Uso de táxi aéreo
Ahmed *et al.* (2021)	Identificar os fatores que influenciam a contratação e pagamento de táxis aéreos e serviços de compartilhamento de carros	• Pesquisa *online* • Modelo probit bivariado	• Recursos de "carros voadores" • Percepção dos "carros voados" • Disposição para pagar por serviço, benefícios, segurança, meio ambiente • Características sociodemográficas

de não escolher atributos que se influenciem entre si, causando situações improváveis (Hair *et al*., 2009), como por exemplo um preço mais baixo relacionado com um serviço extra, como o direito a levar uma mala a mais.

Os atributos escolhidos, com base na revisão de literatura, foram (i) preço, (ii) tempo no "carro voador", (iii) presença de piloto (automação) e (iv) necessidade de deslocamento até o "carro voador" (em torno de 8 minutos de carro ou 20 minutos a pé) (baldeação).

Para escolha dos níveis foram consideradas informações estimadas de custo de operação. O tempo foi determinado baseado em informações de deslocamento do Google Maps de um aeroporto brasileiro. A automação foi uma variável binária. Por fim, o cenário estimado para baldeação, também binário, foi baseado em informações do mesmo caso real, estimado pelo Google Maps. A Tabela 2 descreve os atributos e níveis.

Na técnica de Análise Conjunta devem-se utilizar o número mínimo de perfis conforme a fórmula (1) (Hair *et al*., 2009). Para quatro fatores e dez níveis, o número mínimo de perfis devem ser sete.

$$Nº\ mínimo\ de\ perfis = Nº\ total\ de\ níveis\ de\ todos\ os\ fatores - Nº\ de\ fatores + 1 \quad (1)$$

Após definição dos atributos e níveis foi realizado *o design* fatorial fracionário, a fim de diminuir a quantidade de cenários para melhorar a experiência dos respondentes. Em uma pesquisa sem fatoração seriam necessários a apresentação de 36 perfis. Na fatoração os níveis aparecem em mesma proporção, além disso são mantidos os princípios de ortogonalidade. Além disso, são feitos testes de covariância e correlação, para garantir que as alternativas não estão correlacionadas (Hair *et al*., 2009). A Tabela 3 apresenta o design fatorial, realizando utilizando o *software* livre RStudio.

Tabela 2 Atributos em níveis da Análise Conjunta

Atributos	***Níveis***
Preço	1. R$ 300,00 2. R$ 400,00 3. R$ 500,00
Tempo no "carro voador"	1. 18 min 2. 20 min 3. 22 min
Presença de piloto (automação)	1. Com piloto 2. Sem piloto
Necessidade de deslocamento até o "carro voador" (em torno de 8 min de carro ou 20 min a pé) (baldeação)	1. Sim 2. Não

Com o *design* fatorial fracionário foi criado o questionário divulgado *online* em redes sociais em agosto de 2022, atingindo maior porcentagem de respondentes na região sudeste do país. Em que na primeira sessão havia questões relacionadas ao acesso terrestre aos aeroportos brasileiros, na segunda sessão, cenários para "carros voadores" (UAM) em uma situação de acesso aeroportuário distante 30 km do local de saída do respondente, e a terceira sessão, perguntas sociodemográficas.

Tabela 3 *Design* Fatorial Fracionário da Análise Conjunta

Perfil	***Preço***	***Tempo no "carro voador"***	***Presença de Piloto***	***Necessidade de baldeação***
A	R$ 300,00	18 min	Com piloto	Sim
B	R$ 300,00	20 min	Com piloto	Sim
C	R$ 300,00	22 min	Sem piloto	Não
D	R$ 400,00	18 min	Com piloto	Não
E	R$ 400,00	20 min	Sem piloto	Sim
F	R$ 400,00	22 min	Com piloto	Sim
G	R$ 500,00	18 min	Sem piloto	Sim
H	R$ 500,00	20 min	Com piloto	Não
I	R$ 500,00	22 min	Com piloto	Sim

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os 60 participantes da pesquisa, houve mais homens (63,33%) do que mulheres (36,67%). As maiores faixas etárias são de adultos de 25 a 29 anos (41,67%) e de 30 a 39 anos (33,33%). Os níveis educacionais majoritários são pós-graduação (60%) e graduação (38,33%), além de metade da amostra possuir um emprego. As rendas familiares mais frequentes são de 5 a 10 salários-mínimos (41,67%) e de 1 a 5 salários-mínimos (33,33%), com famílias de 2 (28,33%) ou 3 pessoas (25%). A maioria dos respondentes estão na região sudeste, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 Descrição das características dos participantes

Características sociodemográficas	***Descrição***	***Número***	***%***
Gênero	Feminino	22	36,67
	Masculino	38	63,33
Idade	18 a 24 anos	9	15,00
	25 a 29 anos	25	41,67
	30 a 39 anos	20	33,33
	40 a 49 anos	4	6,67
	50 a 59 anos	1	1,67
	60 anos ou mais	1	1,67
	Prefiro não responder	0	0,00
Nível educacional	Ensino fundamental	0	0,00
	Ensino médio	1	1,67
	Graduação	23	38,33
	Pós-graduação	36	60,00
	Prefiro não responder	0	0,00
Situação atual	Estudante	12	20,00
	Estudante e empregado	9	15,00
	Estudante e desempregado	2	3,33
	Estudante e outro	1	1,67
	Empregado	30	50,00
	Desempregado	1	1,67
	Outro	4	6,67
	Prefiro não responder	1	1,67
Renda familiar	Até 1 salário-mínimo	1	1,67
	De 1 a 5 salários-mínimos	20	33,33
	De 5 a 10 salários-mínimos	25	41,67
	Acima de 10 salários-mínimos	8	13,33
	Prefiro não responder	6	10,00
Tamanho da família	1	12	20,00
	2	17	28,33
	3	15	25,00
	4 ou mais	11	18,33
	Prefiro não responder	5	8,33
Região do Brasil	Norte	1	1,67
	Nordeste	2	3,33
	Centro-Oeste	3	5,00
	Sudeste	52	86,67
	Sul	0	0,00
	Prefiro não responder	2	3,33

Em relação às experiências de acesso terrestre aos Aeroportos Brasileiros, 71,67% dos respondentes acessaram algum aeroporto brasileiro nos últimos 3 anos. Destes, mais da metade acessaram no ano de 2022 (58,14%), utilizando aplicativos de transportes (46,51%), com gasto até 50 reais (48,84%) e tempo de 30 minutos a 1 hora (48,84%). A Tabela 5 detalha as experiências da amostra.

Tabela 5 Descrição das experiências de acesso terrestre aos Aeroportos Brasileiros dos participantes

Acesso Terrestre aos Aeroportos	***Descrição***	***Número***	***%***
Você esteve em algum Aeroporto Brasileiro nos últimos 3 anos?	Sim	43	71,67
	Não	17	28,33
Em que ano você esteve em um Aeroporto Brasileiro pela última vez?	2019	3	6,98
	2020	4	9,30
	2021	10	23,26
	2022	25	58,14
	Prefiro não responder	1	2,33
Qual meio de transporte você utilizou para ir até esse aeroporto?	Aplicativos de Transporte (Uber, 99Táxi e/ou similares)	20	46,51
	Táxi	0	0,00
	Transporte público (ônibus, trem e/ou metrô)	10	23,26
	Veículo próprio (como condutor ou carona)	11	25,58
	Outro(s)	2	4,65
	Prefiro não responder	0	0,00
Qual o gasto você teve para ir até esse aeroporto?	De 0 a 50 reais	21	48,84
	De 50 a 100 reais	14	32,56
	De 100 a 150 reais	6	13,95
	De 150 a 200 reais	0	0,00
	Acima de 200 reais	2	4,65
	Prefiro não responder	0	0,00
Qual tempo você gastou durante o trajeto até esse aeroporto?	De 0 a 30 min	7	16,28
	De 30 min a 1h	21	48,84
	De 1h a 1h30	10	23,26
	De 1h30 a 2h	3	6,98
	Acima de 2h	2	4,65
	Prefiro não responder	0	0,00

Em relação aos “carros voadores” (UAM), para a amostra entrevistada, o atributo com maior importância relativa foi o preço (57,26%), seguido do tempo no “carro voador” (23,90%), baldeação (12,06%) e presença de piloto (6,78%), como mostrado na Figura 1. O preço de R$ 300,00, o tempo no “carro voador” de 18 minutos, a ausência de piloto e a ausência de baldeação, segundo o valor de utilidade parcial da amostra, foram os níveis mais preferidos, como mostrado na Figura 2 e na Tabela 6.

A principal variável que guia a escolha do usuário potencial é o preço, com influência de 57,26%, seguida pelo tempo com 23,90%. Isso demonstra que esses atributos são responsáveis por mais de 80% do critério de escolha da amostra. Esse resultado concorda com os estudos de Fu *et al.* (2019), Haddad *et al.* (2020) e Straubinger *et al.* (2020a). Por outro lado, a presença de piloto teve menor relevância relativa, o que demonstra uma maior aceitação a novas tecnologias e preferência de custos menores em detrimento de receios com automação. Este resultado contradiz com Haddad *et al.* (2020), em que a segurança era o fator mais relevante. Possivelmente isso se deve a amostragem ser composta por indivíduos mais

jovens com nível educacional elevado e maiores rendas, além da amostra ser composta majoritariamente por homens. Outra possibilidade é a influência cultural da população amostrada, ou seja, o brasileiro está mais disposto a aceitar novas tecnologias, desde que implique em menor custo.

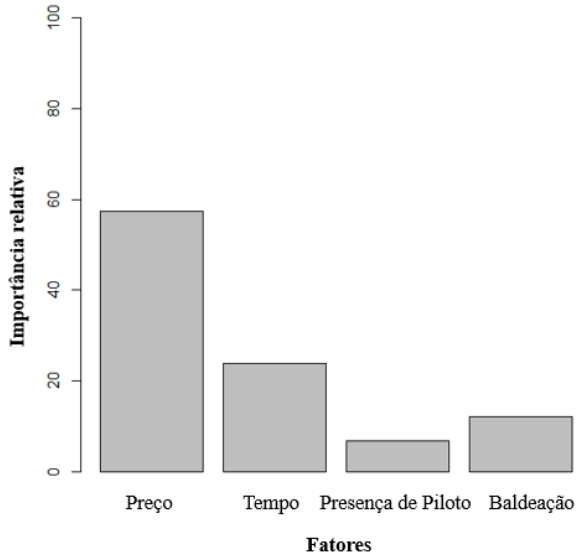


Figura 1 Importância relativa de cada atributo

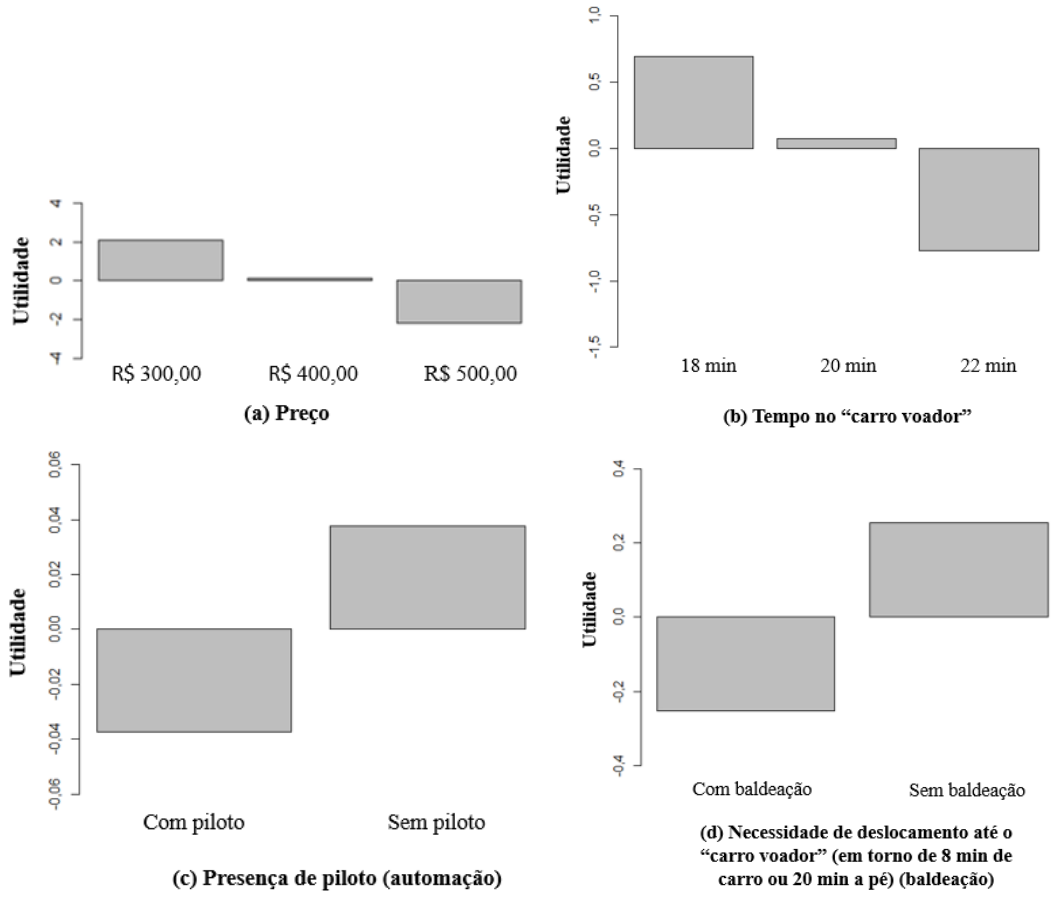


Figura 2 Valor da utilidade para os níveis de (a) preço, (b) tempo no "carro voador", (c) presença de piloto (automação) e (d) necessidade de deslocamento até o "carro voador" (em torno de 8 min de carro ou 20 min a pé) (baldeação)

Tabela 6 Utilidades Parciais dos níveis dos atributos da amostra

Níveis dos atributos	*Utilidades Parciais da amostra*
R$ 300,00	5,0972
R$ 400,00	2,1
R$ 500,00	-2,1944
18 minutos	0,6944
20 minutos	0,0778
22 minutos	-0,7722
Com piloto	-0,0375
Sem piloto	0,0375
Com baldeação	-0,2542
Sem baldeação	0,2542

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos atestam que a população amostrada, majoritariamente da região sudeste do Brasil, prioriza o custo (fator de 57,26%), seguido de tempo (23,90%). Por outro lado, baldeação e presença de piloto tiverem menor relevância relativa, o que demonstra uma preferência por economia de custo e tempo, em detrimento a um deslocamento extra e temor por novas tecnologias.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe a inserção de novas variáveis, o aumento da amostra, tanto quantitativamente quanto qualitativamente, para dividir a análise entre gêneros, faixas etárias, graus de escolaridade, renda, entre outros fatores, a fim de identificar possíveis grupos similares.

Referências

Ahmed, S. S., Fountas, G., Eker, U., Still, S. E. & Anastasopoulos, P. Ch. (2021). An exploratory empirical analysis of willingness to hire and pay for flying taxis and shared flying car services. *Journal Of Air Transport Management*, 90, 01963. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101963

AIRBUS (2017, Jun 17). *Rethinking Urban Air Mobility*. Acessado em 22 de março de 2022, de https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2017-06-rethinking-urban-air-mobility

AIRBUS (2019). *An Assessment of Public Perception of Urban Air Mobility (UAM)*. Acessado em 23 de março de 2022, de https://www.airbusutm.com/uam-resources-community-perception

Bernhard, C., Oberfeld, D., Hoffmann, C., Weismüller, D. & Hecht, H. (2020). User acceptance of automated public transport. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 70, 109-123. doi: https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.02.008

Dillon, A. & Morris, M.G. (1996). User Acceptance of Information Technology: Theories and Models. *Annual Review of Information Science and Technology (ARIST)*, 31, 3-32.

EASA (2021, Mai 19). *Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe*. Acesso em 23 de março de 2022, de https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/uam-full-report.pdf

Eker, U., Fountas, G., Anastasopoulos, P. Ch. & Still, S. E. (2020). An exploratory investigation of public perceptions towards key benefits and concerns from the future use of flying cars. *Travel Behaviour and Society*, 19, 54-66. doi: https://doi.org/10.1016/j.tbs.2019.07.003

Fu, M., Rothfeld, R. & Antoniou, C. (2019). Exploring Preferences for Transportation Modes in an Urban Air Mobility Environment: Munich case study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673, 10, 427-442. doi: https://doi.org/10.1177/0361198119843858

Haan, J., Garrow, L. A., Marzuoli, A., Roy, S. & Bierlaire, M. (2021). Are commuter air taxis coming to your city? A ranking of 40 cities in the United States. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103392. doi: https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103392

Haddad, C. A., Chaniotakis, E., Straubinger, A., Plötner, K. & Antoniou, C. (2020). Factors affecting the adoption and use

of urban air mobility. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 696-712. doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.020

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, J. B. & Anderson, R.E (2009). Multivariate Data Analysis. 7 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Kowalska-Pyzalska, A., Michalski, R., Kott, M., Skowrońska-Szmer, A. & Kott, J. (2022). Consumer preferences towards alternative fuel vehicles. Results from the conjoint analysis. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 155, p. 111776.

Krantz, D. &Tversky, A. (1971). Conjoint-measurement analysis of composition rules in psychology. *Psychological Review*, 78, 2, 151-169. doi: https://doi.org/10.1037/h0030637

Luce, R.D. & Tukey, J.W. (1964) Simultaneous conjoint measurement: A new type of fundamental measurement. *Journal of Mathematical Psychology*, 1, 1, 1-27. doi: https://doi.org/10.1016/0022-2496(64)90015-X

NASA (2018, Nov 21). *Urban Air Mobility (UAM) Market Study*. Acessado em 22 de março de 2022, de https://ntrs.nasa.gov/citations/20190001472

NASA (2019, Jun, 19). *Urban Air Mobility (UAM) Market Study*. Acessado em 22 de março de 2022, de https://ntrs.nasa.gov/citations/20190026762

Papadima, G., Genitsaris, E., Karagiotas, I., Naniopoulos, A. & Nalmpantis, D. (2020). Investigation of acceptance of driverless buses in the city of Trikala and optimization of the service using Conjoint Analysis. *Utilities Policy*, 62, 10099.

Rajendran, S., Srinivas, S. & Grimshaw, T. (2021). Predicting demand for air taxi urban aviation services using machine learning algorithms. *Journal Of Air Transport Management*, 92, 102043. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102043

Shaheen, S., Cohen, A., Yelchuru, B. & Sarkhili, S. (2017, Set 10). *Mobility on Demand Operational Concept Report*. Acessado em 22 de março de 2022, de https:// rosap.ntl.bts.gov/view/dot/34258

Shaheen, S. A., Cohen, A. P., Broader, J., Davis, R. & Brown, L. (2020, Mar 01). *Mobility on Demand Planning and Implementation: Current 51 Practices, Innovations, and Emerging Mobility Futures*. Acessado em 22 de março de 2022, de https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50553

Straubinger, A. , Kluge, U., Fu, M, Al Haddad, C., Ploetner, K. & Antoniou, C. (2020a). Identifying demand and acceptance drivers for user friendly Urban Air Mobility introduction. *Lecture Notes in Mobility. Towards User-Centric Transport in Europe 2: Enablers of Inclusive, Seamless and Sustainable Mobility.*

Straubinger, A., Rothfeld, R., Shamiyeh, M., Büchter, K., Kaiser, J. & Plötner, K. (2020b). An overview of current research and developments in Urban Air Mobility – setting the scene for UAM introduction. *Journal of Air Transport Management*, 87, 1-12. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101852

Walter, M., Haunerland, F. & Moll, R. (2011). Heavily regulated, but promising prospects: Entry in the German Express Coach Market. *Transport Policy*, 18, 2, 373-381. doi: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.11.001

Winter, S. R., Rice, S. & Lamb, T. L. (2020). A prediction model of Consumer's willingness to fly in autonomous air taxis. *Journal Of Air Transport Management*, 89, 101926. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101926

Wu, Z. & Zhang, Y. (2021). Integrated Network Design and Demand Forecast for On-Demand Urban Air Mobility. *Engineering*, 7, 4, 473-487. doi: https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.11.007

PROJETO EMBARQUE MAIS SEGURO

Felipe Pereira de Sousa, Emmanuel Gomes da Silva, Paulo Henrique Possas

Ministério da Infraestrutura, Secretaria Nacional de Aviação Civil,
Departamento de Planejamento e Gestão,
Coordenação-Geral de Facilitação e Desempenho Operacional

felipe.sousa@infraestrutura.gov.br, emmanuel.silva@infraestrutura.gov.br,
paulo.possas@infraestrutura.gov.br

PAPER ID: SIT191

RESUMO

A Secretaria Nacional de Aviação Civil do Ministério da Infraestrutura (SAC/MInfra), em parceria com o Serviço Federal de Processamento de Dados (Serpro), desenvolveu um projeto conjunto para estabelecer um programa de identificação biométrica de passageiros, visando melhorar a facilitação e a segurança dos processos aeroportuários. O projeto, denominado Embarque Mais Seguro, prevê a validação da identidade dos usuários do transporte aéreo por meio de consulta a bancos de dados governamentais, inicialmente o banco de dados da Carteira Nacional de Habilitação (CNH) do Departamento Nacional de Trânsito (Denatran) e posteriormente com outros bancos de dados governamentais, realizando a conferência entre os dados biométricos neles registrados e a imagem do passageiro captada em cada ponto de controle do aeroporto, desde o check-in até o embarque na aeronave, permitindo uma identificação segura e confiável do viajante.

Keywords: Biometria, Tecnologia, Facilitação, Segurança

1. INTRODUÇÃO

Entendendo os grandes benefícios que a adoção da biometria pode trazer para aeroportos e companhias aéreas, não só para o aumento da eficiência dos processos aeroportuários, mas também para a segurança do transporte aéreo, foi criado o Projeto Embarque mais Seguro, uma iniciativa da Secretaria Nacional de Aviação Civil do Ministério da Infraestrutura, em parceria com o Serviço Federal de Processamento de Dados - Serpro, visando a verificação biométrica da identidade dos passageiros e o uso de reconhecimento facial para permitir o acesso à sala de embarque do aeroporto e embarque na aeronave sem a necessidade de qualquer documento ou cartão de embarque.

O Projeto Embarque mais Seguro foi planejado para atender à necessidade de melhorar aspectos relacionados à segurança e facilitação do transporte aéreo. Atualmente, para voos domésticos nacionais, além do cartão de embarque, é necessária a apresentação de documento de identificação válido, para garantir que o passageiro é o titular do bilhete, conforme exigido pela Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC.

Para comprovar a identidade do viajante, são aceitos quaisquer documentos de identificação civil válidos em todo o país, como carteiras de identidade emitidas pelo estado, carteiras de motorista nacionais, passaportes, documentos de identificação emitidos por conselhos profissionais e órgãos militares, identidades funcionais emitidas pelo governo, entre outros, muitos deles com controles frágeis em sua emissão.

Assim, o principal objetivo do projeto é verificar a identidade dos viajantes por meio da validação biométrica do passageiro no momento do check-in, cruzando-a com o registro biométrico contido em bancos de dados governamentais, possibilitando uma conferência precisa e segura da identidade do viajante. Além disso, ao vincular sua biometria ao cartão de embarque, permitir que todo o trajeto do passageiro dentro do ambiente aeroportuário seja feito sem a necessidade de verificações adicionais de sua identidade por meio de apresentação de documentos de identificação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Quando se fala de operações aeroportuárias existem dois aspectos fundamentais que sempre devem ser observados na definição dos processos, são eles: facilitação e segurança.

Sobre o assunto a ICAO (2017,1), define que os processos de facilitação e segurança devem ser desenvolvidos em conjunto, observando seus requisitos e com foco na solução dos problemas operacionais.

Isso significa que toda solução que almeje a melhoria de facilitação não deve prejudicar planejamento da segurança, da mesma forma que o planejamento de segurança deve observar a facilitação do transporte aéreo.

Nos últimos anos a indústria aeronáutica tem apresentado novas utilizações da biometria para a melhoria fluxo de passageiros nos aeroportos.

A adoção de sistemas biométricos possibilita a melhoria do fluxo de passageiros, uma vez que facilita o processamento dos passageiros, sem prejudicar a confiabilidade da identificação.

A importância da identificação das pessoas nas áreas operacionais dos aeroportos é confirmada pelas determinações do Anexo 17 (ICAO, 2017, 2). Neste documento fica explícito a necessidade dos Países signatários da Convenção de Chicago garantirem a identificação das pessoas com foco em evitar a ocorrência atos de interferência ilícita.

2.1. Biometria e controle acesso

A biometria aparece como solução para garantir a identificação das pessoas por alguma característica física.

Segundo ASHA e CHELLAPAN (2012), o uso da biometria permite identificar uma pessoa por quem ela é e não pelo que ela está portando. Nesse sentido, o uso da biometria é capaz de dispensar a comprovação de identidade com base em documentos físicos, que podem ser adulterados, garantindo a identificação das pessoas.

Ainda segundo ASHA e CHELLAPAN (2012), o objetivo da biometria é “facilitar o acesso controlado a aplicativos, redes, computadores e instalações físicas”.

A utilização eficaz da biometria como forma de identificação para o acesso às instalações aeroportuárias está diretamente ligada a qual tipo de biometria escolhido para viabilizar a identificação.

Atualmente a autenticação biométrica pode ser efetivada por quinze métodos destintos, são eles: DNA, orelha, rosto, termograma facial, impressão digital, marcha (ritmo da caminhada), geometria da mão, padrão das veias da mão, íris, digitação, odor, retina, assinatura, voz e impressão da palma da mão (ASHA e CHELLAPAN, 2012).

Por mais que todos os métodos listados no parágrafo anterior tenham suas características específicas, é possível destacar cinco métodos aplicáveis a identificação de pessoas para o acesso de instalações físicas, são elas: rosto, termografia facial, impressão digital, padrão das veias da mão e impressão da palma da mão.

Segundo LIU e SILVERMAN (2001), vários métodos de identificação biométrica podem ser utilizados para um mesmo fim, inclusive os métodos podem ser combinados para aumentar o nível de confiança na informação, logo é necessário se definir parâmetros para a escolha do método mais adequado.

Especificamente sobre o acesso às áreas operacionais dos aeroportos, deve-se considerar a diversidade do público como um fator importante para a escolha do método.

Além disso, é importante destacar que a ICAO (*International Civil Aviation Organization*) tem incentivado a adoção de tecnologias que promovam a adoção de processos de viagem sem contato, com objetivo de dificultar a transmissão de enfermidades e facilitar o controle de possíveis epidemias.

Com base nesses pontos, podemos definir alguns requisitos que devem ser observados para o melhor uso nos aeroportos, são eles: Nível de segurança, precisão, facilidade de uso e a possibilidade de utilização sem a necessidade de toque.

Considerando os requisitos listados acima, entende-se que a método de biometria mais adequado para a utilização em aeroportos é a facial.

ASHA e CHELLAPAN (2012) destacam que a biometria facial traz uma série de vantagens. Dentre elas pode-se destacar que o contato físico é dispensado para o seu uso. Além disso seu uso facilitado por não necessitar de grandes investimentos para implantação, uma vez que câmeras convencionais podem ser utilizadas com bons resultados.

Por não precisar acionamentos em um equipamento específico, considera-se a biometria facial um meio amigável para o usuário.

Para LIU e SILVERMAN (2001), a biometria facial não apresenta uma utilização complexa e é bem aceita pelo usuário. Além disso apresenta uma boa precisão e o nível de segurança médio.

2.2. Facilitação e segurança na aviação

A segurança e facilitação na aviação eram vistos como princípios antagônicos, onde o aumento de um invariavelmente acarretaria a redução do outro.

Hoje essa percepção mudou sendo desejável que estes dois princípios caminhem juntos proporcionando a melhor utilização da infraestrutura instalada sem detrimento da segurança das operações.

Segundo a ICAO (2017,1), os processos de facilitação e segurança devem ser desenvolvidos em conjunto, observando seus requisitos e com foco na solução dos problemas operacionais.

O avanço da tecnologia possibilita que a orientação da ICAO seja alcançada com maior facilidade. A utilização de sistemas de identificação de biometria facilita significativamente o fluxo de pessoas nos terminais além de melhorar a confiabilidade da identificação.

Sobre a validação dos documentos de viagem, a ICAO (2017,2) entende que o Estado deve auxiliar os operadores aéreos na conferência dos documentos com o objetivo de evitar fraudes.

Alinhado com esse pensamento, entende-se que a competência para a verificação da identidade dos viajantes deve ser assumida pelo Governo Federal, a partir da consulta à bancos de dados governamentais cuja entrada de dados se dê de forma segura e com baixa exposição à eventuais fraudes, como o banco de dados de Passaportes da Polícia Federal, o banco de dados eleitoral desenvolvido pelo Tribunal Superior Eleitoral e o banco de dados da Carteira Nacional de Habilitação – CNH, do Departamento Nacional de Trânsito – Denatran, desenvolvido e administrado pelo Serpro.

2.2.1. Embarque convencional (cenário atual)

No Brasil, para embarque em voos domésticos, além do bilhete de embarque, é necessária a apresentação de documento de identificação válido, de forma a assegurar que o passageiro seja o detentor do bilhete, conforme definido texto abaixo:

> *"108.25 (d) O operador aéreo, durante os procedimentos de embarque, deve realizar a identificação do passageiro de forma a assegurar que, ao embarcar na aeronave, o passageiro seja o detentor do bilhete aéreo e esteja de posse de documento válido de identificação, nos termos estabelecidos em normatização específica sobre a matéria.". (ANAC, 2022)*

Atualmente, a validação do documento dos passageiros é realizada por funcionário da empresa aérea, o qual, muitas vezes, não possui a expertise necessária para identificar fraudes nos documentos de identificação. Tal situação se agrava pelo fato da existência de uma grande diversidade de documentos de identificação aceitos para embarque no Brasil, como cédulas de identidade de emissão estadual, carteiras de habilitação (CNHs), passaportes, carteiras de trabalho, documentos de identificação emitidos por conselhos profissionais (OAB, CREA, CRM, etc.) e órgãos militares, identidades funcionais emitidas pelos poderes executivo, legislativo e judiciário, entre outros.

2.2.2. Embarque biométrico (novo cenário)

A proposta do Embarque mais Seguro é realizar a validação da identidade dos viajantes por meio da captura biométrica do passageiro no momento do check-in, confrontando-a com o registro biométrico contido nos bancos de dados governamentais e possibilitando uma conferência precisa e segura da identidade do viajante, além de permitir que, a partir da vinculação de sua biometria ao bilhete aéreo adquirido, toda a jornada do passageiro dentro do ambiente aeroportuário seja feita sem a necessidade de novas verificações de sua identidade por meio da apresentação de documentos de identificação.

A iniciativa não se restringe apenas a passageiros e atende também à validação do Certificado de Habilitação Técnica (CHT) dos tripulantes, os quais poderão acessar as áreas operacionais dos aeroportos sem a necessidade de apresentação de documentos.

Essa validação é possível por meio da checagem da identidade dos membros da tripulação com o banco de dados Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) por meio da biometria facial.

Além dos pontos citados até o momento, destaca-se que a experiência de viagem do passageiro e tripulantes é aprimorada com a adoção da identificação biométrica, que possibilita ao viajante uma jornada descomplicada e livre de qualquer tipo de contato físico.

A adoção da identificação biométrica de passageiros impactará a forma como os processos aeroportuários são conduzidos atualmente, em especial nos pontos de controle aos quais os passageiros são submetidos: o check-in, o acesso à sala de embarque e o embarque na aeronave.

É válido dizer que o processo biométrico não invalida o procedimento tradicional de identificação por meio da apresentação de documentos. Dessa forma, nos casos de impossibilidade de uso dos sistemas de validação biométrica, o método tradicional ainda continua sendo uma opção válida.

3. O PROJETO

A implantação do projeto embarque mais seguro permitiu que a identificação do viajante fosse realizada no momento do check-in, seja por meio da apresentação no balcão ou pelo registro em aplicativos específicos.

Nesse momento ocorre a captura dos dados biométricos, o passageiro fornece seu Cadastro de Pessoa Física (CPF) e registra o aceite dos termos da LGPD. Após esse passo, a biometria é vinculada ao bilhete aéreo, permitindo a passagem pelos demais pontos de controle de acesso apenas com o uso da biometria.

Essas informações são utilizadas para a validação dos dados biográficos e biométricos junto aos bancos de dados governamentais por meio de uma ferramenta desenvolvida pelo Serpro para permitir tal verificação.

A checagem da biometria por meio da consulta aos registros governamentais será realizada apenas nessa etapa, sendo que as conferências seguintes, para o acesso à sala de embarque e o embarque na aeronave, serão feitas pelos equipamentos de captura biométrica, posicionados nesses pontos de acesso, confrontando com a foto capturada no momento do check-in. Assim, será desenvolvido um banco de dados de biometria paralelo, permitindo o armazenamento da foto mais recente dos viajantes. Caso autorizado expressamente pelo passageiro, sua biometria poderá ser armazenada para viagens futuras, dispensando-o da etapa de cadastramento nos voos seguintes.

No caso dos tripulantes, o cadastro biométrico é feito antes do acesso à área restrita do aeroporto por meio de um aplicativo desenvolvido pelo SERPRO no qual o tripulante insere seus dados de identificação (nome, CPF, nº do CHT) e captura sua biometria por meio de uma foto frontal. Assim, tal qual acontece com os passageiros, nos portões de acesso à sala de embarque, essa biometria do tripulante é utilizada para checagem e validação tanto da sua identidade quanto da validade da sua CHT. Considerando que não é necessário a identificação dos membros da tripulação na entrada da aeronave, a identificação biométrica só ocorre nessa etapa.

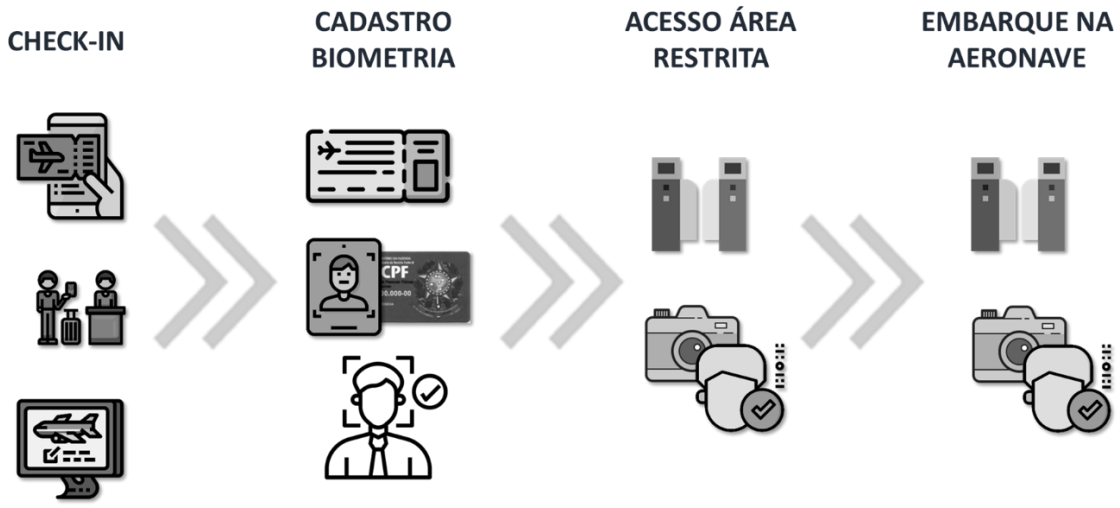


Figura 1 - Fluxo Embarque mais Seguro passageiros

4. BENEFÍCIOS ESPERADOS

Além dos ganhos em segurança e eficiência já citados, o Projeto Embarque mais Seguro também trará outros benefícios aos atores envolvidos em sua implementação, em especial aos aeroportos e cias aéreas, pois espera-se uma redução expressiva nos custos de operação de ambos por meio da adoção da tecnologia de reconhecimento biométrico.

Ainda, caso aeroportos e empresas aéreas tenham permissão de acesso às informações dos passageiros, estes serão capazes de oferecer uma experiência de viagem diferenciada, benefícios exclusivos e direcionados ao perfil de cada viajante, além da personalização da comunicação com esse passageiro, possibilitando um eventual aumento das receitas.

Para as empresas provedoras de soluções tecnológicas de reconhecimento biométrico, a implementação do projeto irá fomentar o mercado nacional, abrindo novas oportunidades de negócios e possibilitando que a concorrência do setor viabilize a redução dos custos envolvidos na aquisição dos equipamentos, bem como sua manutenção.

Os benefícios aos passageiros serão mais perceptíveis pois espera-se uma redução significativa nos tempos de espera para embarque na aeronave, além da possibilidade de, mediante consentimento no compartilhamento de seus dados pessoais, terem acesso à uma experiência de viagem personalizada, a partir do perfil de viajante de cada um.

Outro ponto relevante na adoção dessa iniciativa, no contexto de pandemia ao qual

estamos submetidos atualmente, é possibilitar uma jornada totalmente livre de toques ou interação humana, desde o check-in, passando pelo despacho de bagagem e o embarque na aeronave, reduzindo a possibilidade de contágio pelo coronavírus ou outros agentes nocivos à saúde.

Além disso, o rastreamento de passageiros possivelmente infectados será facilitado às autoridades sanitárias do país, a partir do acesso às informações pessoais do viajante juntamente com sua biometria.

5. TRATAMENTO E PROTEÇÃO DOS DADOS

O Projeto Embarque mais Seguro tem como premissa a segurança no tratamento dos dados pessoais dos passageiros e a proteção dessas informações contra seu uso indevido ou não autorizado, sendo integralmente alinhado à Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais – LGPD, Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018.

Especificamente no aspecto relacionado à identificação dos passageiros, o projeto adotou como premissa o tratamento de dados pessoais realizado mediante o fornecimento de consentimento pelo titular dos dados, conforme o inciso I, do Art 7º da referida Lei. Dessa forma, o passageiro que opta por realizar o seu cadastro biométrico, primeiramente precisa ler e aceitar o Termo de Consentimento para Tratamento de Dados Pessoais disponibilizado no aplicativo da empresa aérea. O Termo traz, dentre outros dados, aqueles essenciais previstos na LGPD, como identificação do Controlador, do encarregado de dados, dos operadores, finalidade do tratamento de dados, descrição dos dados tratados, meios de revogação do consentimento, direitos do titular de dados etc.

Quanto à possibilidade da utilização dos dados pessoais dos passageiros por aeroportos, cias aéreas ou outros interessados do setor privado para melhoria da experiência de viagem, por exemplo, tal utilização somente poderá ser realizado mediante o consentimento do titular dos dados por escrito ou por outro meio que demonstre a manifestação de sua vontade, devendo referir-se somente às finalidades determinadas.

Nesse sentido, o Projeto Embarque mais Seguro também se encontra totalmente alinhado com as principais iniciativas e projetos internacionais, como o *"Traveller Identification Programme – TRIP*" da Organização da Aviação Civil Internacional e o "*One ID*" da Associação Internacional do Transporte Aéreo (IATA).

6. RESULTADOS OBTIDOS

Considerando o impacto da pandemia de coronavírus sobre o andamento do projeto em 2020, após longo período de planejamento, desenvolvimento e negociação com aeroportos, empresas aéreas, empresas de tecnologia e órgãos públicos, em outubro de 2020 deu-se início ao piloto do projeto Embarque mais Seguro. Os primeiros processamentos biométricos de passageiros foram feitos no aeroporto de Florianópolis (SBFL) com a empresa aérea Latam.

O processo iniciou-se apenas com passageiros e, considerando que as empresas aéreas ainda não tinham a funcionalidade de cadastro biométrico implementado em seus aplicativos, o cadastro biométrico do passageiro, feito no momento do check-in, foi realizado por meio de aplicativo do SERPRO, desenvolvido especificamente para esse fim. Nessa fase inicial, o passageiro também precisava ter em mãos o seu cartão de embarque tanto para o cadastro biométrico no check-in quanto para os acessos à sala de embarque e embarque na aeronave. Vale ressaltar, que neste momento, as validações biométricas se davam perante o confronto com os dados da base de dados da Carteira Nacional de Habilitação (CNH) do DENATRAN, que tem cerca de 64 milhões de registros válidos. Dessa forma, apenas pessoas que tivessem uma CNH estavam habilitadas a participar do projeto

Os testes do conceito foram ampliados para outros 6 aeroportos interessados, a saber, Salvador (SBSV), Santos Dumont (SBRJ), Confins (SBCF), Congonhas (SBSP), Brasília (SBBR) e Ribeirão Preto (SBRP), envolvendo as 4 empresas aéreas do país (Azul, Gol, Latam e Voepass) e diversos fornecedores de equipamento de leitura biométrica. Todos os entes envolvidos optaram por participar do

projeto piloto de forma voluntária e assumindo seus próprios custos para realização dos testes.

Numa segunda fase de evolução da solução, o cartão de embarque passou a ser requerido apenas durante o processo de cadastro biométrico do passageiro, dispensando-se nos acessos à sala de embarque e embarque na aeronave, uma vez que esse cartão de embarque agora passou a ser associado à biometria do passageiro. Além disso, a Secretaria de Governo Digital do Ministério da Economia viabilizou a conexão do Embarque mais Seguro com a base de dados biométrica de eleitores do Tribunal Superior Eleitoral (TSE), que contém cerca de 120 milhões de pessoas com biometria cadastrada, ampliando-se assim o rol de pessoas aptas à realização de um embarque biométrico.

Em meio ao desenvolvimento dos testes, as 3 principais empresas aéreas, de forma a agregar mais valor ao projeto e aos serviços ofertados a seus clientes, iniciaram seus respectivos desenvolvimentos para adição da funcionalidade de cadastro biométrico em seus aplicativos. Tal funcionalidade sendo executada no ambiente da empresa aérea, agora permite que a associação entre cartão de embarque e biometria do passageiro seja feita de forma automática.

Em setembro de 2021, foi oficialmente dado como encerrada a fase de piloto do projeto com a execução em 258 voos e 4771 passageiros processados em 7 aeroportos. Contudo, o SERPRO se propôs a continuar dando suporte, em menor escala, aos aeroportos e cias aéreas que necessitassem realizar mais testes. Dessa forma, considerando os 7 aeroportos e 4 empresas aéreas, em janeiro de 2022, o projeto tinha processado biometricamente 6.257 passageiros e 295 tripulantes durante a execução de 328 voos. Dados fornecidos pelo SERPRO.

Em relação ao tempo de processamento por passageiro na etapa de embarque na aeronave, com base nas informações das empresas aéreas, tem-se, em média, o embarque de 8 passageiros por minuto utilizando-se o método tradicional de embarque de passageiros, o que corresponde a 7,5s por passageiro processado. Para o processamento biométrico de passageiros, com base na observação dos embarques realizados, foi obtida uma média de cerca de 5,4 segundos por passageiro, que corresponde a cerca de 11 passageiros por minuto, ou seja, redução de 28% no tempo de processamento por passageiro e ganho de 37,5% no número de passageiros processados por minuto.

Vale ressaltar, que para a aferição do tempo de processamento biométrico mede-se o tempo do instante em que o passageiro se coloca na frente do equipamento para a realização da leitura biométrica até o momento em que ele recebe o sinal positivo ou negativo do equipamento.

A Comissão Nacional de Autoridades Aeroportuárias (CONAERO), fórum consultivo e deliberativo formado por representantes de nove órgãos do governo federal que trabalham diretamente na gestão dos aeroportos do País, sob coordenação da Secretaria Nacional de Aviação Civil, visando estimular a adoção da biometria na aviação civil, publicou a Resolução Conaero nº 1, de 25 de janeiro de 2022, que recomenda ao setor de aviação civil a adoção de identificação biométrica de viajantes e profissionais no transporte aéreo no Brasil.

Nesse sentido, em 11 de fevereiro de 2022, foi assinado acordo de cooperação técnica entre Serpro e Infraero para viabilizar a execução do projeto Embarque mais Seguro nos aeroportos de Santos Dumont e Congonhas, a mais importante ponte aérea do país. O acordo previu, por parte da Infraero, o fornecimento dos equipamentos com capacidade de leitura biométrica para serem instalados nos pontos de acesso às salas de embarque e acesso às aeronaves para os dois aeroportos; ao passo que, a cargo do Serpro, ficou o fornecimento da solução de validação biométrica.

Assim, após realização do processo licitatório para compra de equipamentos e realização da devida integração entre os sistemas dos aeroportos, Serpro e empresas aéreas, no último dia 9 de agosto, foi dado início à operação de voos com embarques biométricos partindo dos dois aeroportos citados por último. Importante citar que, o início dessa operação se configura como a primeira ponte aérea no mundo a permitir que um passageiro realize voos de ida e volta sem

a necessidade de apresentação de qualquer documento no aeroporto.

7. CONCLUSÃO

Por hora, o projeto tem sua aplicação direta nos voos domésticos brasileiros, sendo ainda um grande desafio a adoção em larga escala pelos aeroportos brasileiros concedidos. Contudo se percebem enormes possibilidades de expansão da solução, por exemplo, expansão para o estrato internacional da aviação civil, com a possibilidade da conexão às bases de dados de passaportes, para outros modais de transporte de passageiros e até para outros setores, como o hoteleiro.

Além disso, com as recentes alterações estabelecidas pelo Decreto nº 10.977, de 23 de fevereiro de 2022, para o documento em si, além do processo de emissão e organização da base de dados centralizada da Carteira de Identidade, abre-se a possibilidade de expansão do projeto de tal forma que menores de 16 anos também poderiam embarcar utilizando a biometria, bastando, em tese, que se estabeleça a comunicação do projeto com essa base

Com o Projeto Embarque Mais Seguro, a adoção da identificação biométrica dos passageiros e o compartilhamento amplo de suas informações de viagem vão além da simples dispensa de um cartão de embarque ou um documento físico de identidade. Elas revolucionarão a forma como os viajantes se relacionam com as empresas aéreas, aeroportos e órgãos públicos e trarão segurança, eficiência e benefícios a todos os envolvidos.

Referências

ANAC. (16 de Mai de 2022). *Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil - RBAC nº 108 (Emenda nº 05) - Segurança da Aviação Civil Contra Atos de Interferência Ilícita – Operador Aéreo*. Acesso em 26 de ago de 2022, disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/boletim-de-pessoal/2022/bps-v-17-no-18-02-a-06-05-2022/rbac-108-emd-05

ASHA, S & CHELLAPPAN, C (fevereiro de 2012). Biometrics: An Overview of the Technology, Issues and Applications. *International Journal of Computer Applications – Volume 39* (pp. 35-52).

ICAO (17 de Jun de 2017, 1). *International Civil Aviation Organization. Annex 9 - Facilitation* (15 ed.). Montreal: ICAO.

ICAO (03 de Ago de 2017, 2). *International Civil Aviation Organization. Annex 17, Security — Safeguarding International Civil Aviation Against Acts of Unlawful Interference* (10 ed.). Montreal: ICAO.

LIU, S & SILVERMAN M (Jan-fev 2001). A Practical Guide to Biometric Security Technology. *IT Profissional – Volume 3- nº 01* (pp. 27-32). doi: 10.1109/6294.899930.

ANÁLISE DE PARÂMETROS DE IRREGULARIDADE LONGITUDINAL E RESPOSTAS DE ACELERAÇÃO VERTICAL EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Lucas Moreira Magalhães, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

***E-mail do autor de correspondência**: lucasmoreiramagal@alu.ufc.br

PAPER ID: SIT203

RESUMO

A irregularidade longitudinal é um dos principais parâmetros relacionados ao conforto das operações de pousos, decolagens e taxiamento em pavimentos aeroportuários. O uso desse parâmetro permite definir procedimentos racionais para tomada de decisão de estratégias de manutenção e reabilitação de um Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários. O crescimento da aviação civil na última década gerou a demanda por maiores cuidados relacionadas à segurança operacional de pousos e decolagens, pois uma parcela considerável das ocorrências de incidentes e acidentes com aeronaves acontecem em solo durante essas fases de voo. Valores além do limite regulamentado para a irregularidade longitudinal podem resultar em deslocamentos verticais excessivos nas aeronaves, provocando problemas na leitura de instrumentos de navegação da cabine do piloto, aumentar a distância de frenagem da aeronave e, em casos extremos, proporcionar avarias na aeronave e afetar o bem-estar dos passageiros. Dessa maneira, este trabalho visa analisar índices de irregularidade longitudinal e sua pertinência com o atual parâmetro de irregularidade regulamentado para pistas aeroportuárias brasileiras. Avaliou-se, por meio de correlações, os valores médios obtidos do *International Roughness Index* (IRI), parâmetro atualmente regulamentado no Brasil, e o *Runway Roughness Index* (RRI), conjuntamente à valores de aceleração vertical na cabine dos pilotos (VACP), para 9 perfis longitudinais de diferentes condições de irregularidade, dez velocidades e duas aeronaves (Boeing 737 e Boeing 747). Os resultados indicam que o IRI demonstra valores conservadores quanto à classificação de condição de irregularidade da pista em relação ao RRI, que acompanha os valores de VACP das aeronaves. Ainda, os valores de RRI, referentes a variação do tipo de aeronave e velocidade desenvolvida, não são bem explicadas pelo IRI, tendo valores de coeficiente de correlação (r) reduzidos para velocidades e severidade de irregularidade maiores.

Palavras-chave: Irregularidade Longitudinal; IRI; RRI; Aceleração Vertical.

1. INTRODUÇÃO

O processo de manutenção e reabilitação (M&R) em pavimentos aeroportuários requer informações da sua condição funcional que subsidiem a tomada de decisão pelos operadores, para manter níveis apropriados de segurança das operações. Nesse contexto, a irregularidade longitudinal é uma característica que deve ser avaliada em pavimentos aeroportuários, pois está associada a impactos na segurança das operações em solo e na vida útil da estrutura (Liu *et al*., 2021), sendo comum sua utilização na estruturação de Sistemas de Gerência de Pavimentos Aeroportuários.

A irregularidade longitudinal pode ser descrita como os desvios verticais de um pavimento em relação a um plano de referência, com dimensões características que podem afetar a dinâmica da aeronave, a qualidade da viagem e a carga dinâmica do pavimento, podendo causar vibrações excessivas na cabine dos pilotos e trazer riscos às aeronaves e tripulantes (ASTM, 2018). De forma diferente a avaliação para rodovias, nas quais o conforto ao rolamento é determinante nos limites de índices de desempenho, para pavimentos aeroportuários, o conforto dos passageiros, mesmo sendo importante, frequentemente não é significante, pelo pequeno tempo de contato ao solo em relação ao total do voo, importando o controle direcional do piloto da aeronave (Emery, Hefer e Horak, 2015).

Apesar de sua importância, a avaliação da irregularidade de pavimentos aeroportuários é complexa, devido às diferenças nas dimensões e desempenho das aeronaves. A resposta à irregularidade varia conforme o modelo da aeronave, método de operação, peso, configuração do trem de pouso e sua velocidade quando encontra um solavanco (*bump*) ou depressão. *Bumps* são eventos isolados de alteração da elevação em distância de até 100 metros, relativamente curtas em relação ao perfil. A depender da velocidade da aeronave e a elevação, os *bumps* podem provocar reações dinâmicas cuja energia não é completamente absorvida pela suspensão da aeronave, sendo sentida por tripulantes e passageiros (FAA, 2009).

Um índice de irregularidade, regulamentado no Brasil como parâmetro de avaliação, é o *International Roughness Index* (IRI), desenvolvido para pavimentos rodoviários, com patrocínio do Banco Mundial, após o *International Road Roughness Experiment* (IRRE) (Sayers e Karamihas, 1998). Segundo Sayers, Gillespie e Patterson (1986), o IRI é significativo como um indicador da capacidade de serviço do pavimento, independentemente do tipo de equipamento utilizado para medi-lo, não importando o local de medição, sendo transferível geograficamente, e estável no tempo.

Todavia, o uso do parâmetro IRI para a avaliação da irregularidade em pavimentos aeroportuários mostra-se inapropriado, pois deve ser avaliado em função das características físicas e aerodinâmicas das aeronaves, porém seu modelo matemático e critérios técnicos não consideram o efeito da resposta dinâmica da aeronave (Durán; Fernandes Jr., 2020). Vários autores não recomendam a utilização do IRI em pavimentos aeroportuários (Chen e Chou, 2004; Emery *et al*., 2015; Loprencipe *et al*., 2019; Tian *et al*., 2021), particularmente em virtude das variações da estrutura, velocidades e dinâmica em veículos automotores e aeronaves (Ling *et al*., 2017; Cardoso *et al*., 2018).

Um dos fatores avaliados para quantificar a severidade da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários é a aceleração vertical causadas a aeronaves. A influência da aceleração sobre as aeronaves se distingue do âmbito rodoviário, sendo as aeronaves sensíveis aos comprimentos de onda longos e curtos (Ling *et al*., 2017). Segundo Gerardi (2007), em perfis longitudinais, áreas com comprimentos de onda maiores causam uma resposta da estrutura rígida da aeronave como um todo, provocando danos por fadiga.

Diante das limitações observadas em índices atualmente utilizados na avaliação da irregularidade longitudinal, a concepção de um novo método tem sido o foco dos esforços da *Federal Aviation Administration* - FAA, com intuito de abranger as acelerações verticais das aeronaves em seu cálculo. Como resultado, um novo índice denominado *Runway Roughness Index* (RRI) está sendo desenvolvido, baseado parcialmente no *Boeing Bump Index* (FAA, 2021). O RRI é definido em termos de valores de simulação de acelerações verticais na cabine dos

pilotos (*Weighted Root-Mean Square Vertical Accelerations at the Cockpit* - WtRMS-VACP) para a aeronave Boeing 737-800 quando essa se desloca a uma velocidade de operação constante de aproximadamente 185 km/h (100 nós), comparadas à valores reais coletados de uma aeronave Boeing 727.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da irregularidade longitudinal de pistas de pouso e decolagem para o IRI e a aceleração vertical da cabine dos pilotos de aeronaves (*Vertical Accelerations at the Cockpit* - VACP), por meio do índice RRI, para duas aeronaves distintas e para 10 velocidades distintas. Os valores de IRI e RRI serão comparados de forma gráfica e estatística, avaliando o limite regulamentado de IRI e as classificações de RRI, que se aproximam dos valores limite apontados pelo meio científico de acelerações verticais relacionados a reclamação de pilotos devido à irregularidade da pista (0,4 g) (Morris & Hall, 1965).

2. MÉTODO

As seguintes etapas metodológicas foram executadas: (i) definição dos perfis longitudinais a serem utilizados; (ii) processamento de dados de irregularidade longitudinal e (iii) análise comparativa entre parâmetros de irregularidade para as diferentes condições de velocidade, espaçamento e aeronaves.

A seleção dos perfis longitudinais de elevação foi feita a partir de um banco de dados da FAA, utilizados para pesquisas de irregularidade longitudinal conjunto entre avaliação objetiva e subjetiva em simuladores de voo Boeing 737-800 e Airbus A330-200, contando com 37 perfis de pistas de pouso e decolagem no total (FAA, 2017; 2020). Os perfis selecionados foram baseados em seus valores de IRI médio e separados em 3 grupos de severidade de irregularidade longitudinal: Bom, que inclui os três melhores resultados de IRI médio dentre os 37 perfis; Intermediário, sendo esses três perfis posicionados no centro da relação de perfis; e Ruim, incluindo os 3 perfis com maiores valores de IRI médio. A Tabela 1 expõe os perfis selecionados, com código B para Bom, I para Intermediário e R para Ruim, referentes a severidade de irregularidade longitudinal das pistas estudadas.

Tabela 1 Perfis longitudinais selecionados

Perfil	*Extensão (m)*	*IRI médio*
B1	1583,3	0,708
B2	1581,0	0,739
B3	1559,8	1,042
I1	1552,5	1,763
I2	1586,3	2,009
I3	1583,5	2,174
R1	1583,8	4,923
R2	1584,5	5,517
R3	1585,3	5,885

Os dados utilizados foram obtidos por meio de processamento dos perfis pelo *software* ProFAA, versão 20_10-14-13. Essa versão foi usada por contar com as aeronaves selecionadas para esse trabalho (B737- 800 e B747-SP) em sua biblioteca, garantindo características de estrutura e arranjo de trens de pouso diferenciados para comparação do parâmetro de aceleração vertical (RRI). Os valores de IRI e RRI foram obtidos para seções de 40 metros, a fim de discretizar os valores sobre a avaliação da condição do pavimento, em relação os valores limites regulamentados e indicados pela literatura, sendo utilizados 39 segmentos para cada pista analisada.

O valor de IRI foi obtido para cada pista e para seu tipo de segmentação, por seu valor estar associado apenas ao perfil longitudinal da pista analisada. Além desses parâmetros, o RRI, a velocidade e o tipo de aeronave foram variados, por seu valor estar associado ao WtRMS-VACP obtido na simulação do ProFAA. Todos os

valores obtidos das simulações utilizados na análise são valores médios dos índices. As velocidades usadas no processamento dos perfis foram:

- 20 nós (37 km/h)
- 40 nós (74 km/h)
- 60 nós (111 km/h)
- 80 nós (148 km/h)
- 100 nós (185 km/h)
- 120 nós (222 km/h)
- 140 nós (260 km/h)
- 160 nós (296 km/h)
- 180 nós (333 km/h)
- 200 nós (370 km/h)

O valor de RRI, utilizado para as análises, pode ser calculado por meio da equação (1):

$$RRI \equiv 0{,}378\left[\frac{s^2}{m}\right] xWtRMS[\frac{m}{s^2}] \qquad (1)$$

Valores limites foram propostos na concepção do RRI, e foram interpretados como uma matriz colorida neste trabalho, como uma ferramenta de análise visual para as seções avaliadas. A matriz está exposta na Tabela 2.

Tabela 2 Matriz colorida de limites de RRI

Intervalo de RRI	*Classificação*
0 – 0,37	Manutenção geral
0,37 - 0,75	Programar manutenção
0,75 – 1,0	Reparo
1,0 – 1,5	Excessivo
> 1,5	Inaceitável

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando as diferenças apresentadas nas comparações entre as velocidades da aeronave em relação ao seu impacto sobre os valores de RRI, observa-se que o IRI, conforme o aumento da severidade da irregularidade longitudinal, não demonstra alteração em seus valores da mesma forma que o parâmetro RRI. Os Gráfico 1, Gráfico *2* e Gráfico 3 expõem os valores de RRI e IRI para cada conjunto de severidade de pistas: Bom, Intermediário e Ruim.

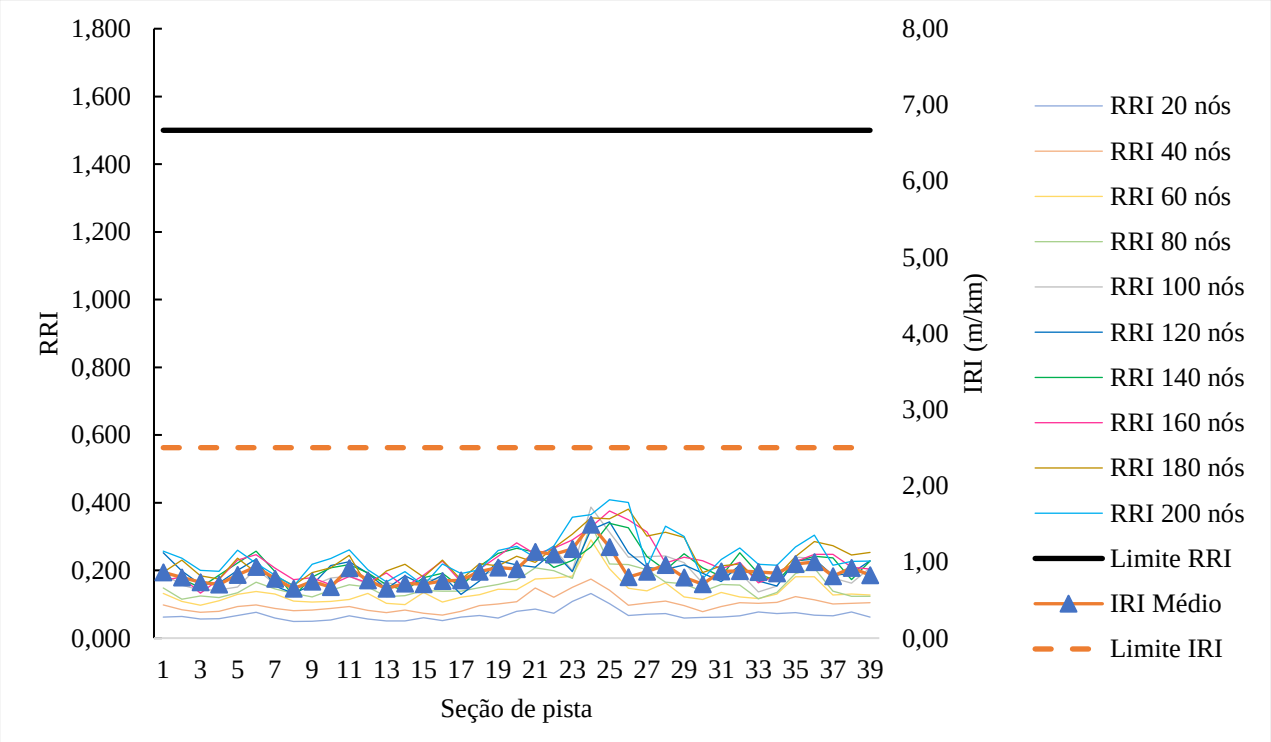


Gráfico 1 Valores de IRI e RRI para o conjunto de pistas de severidade Bom, para o B737-800

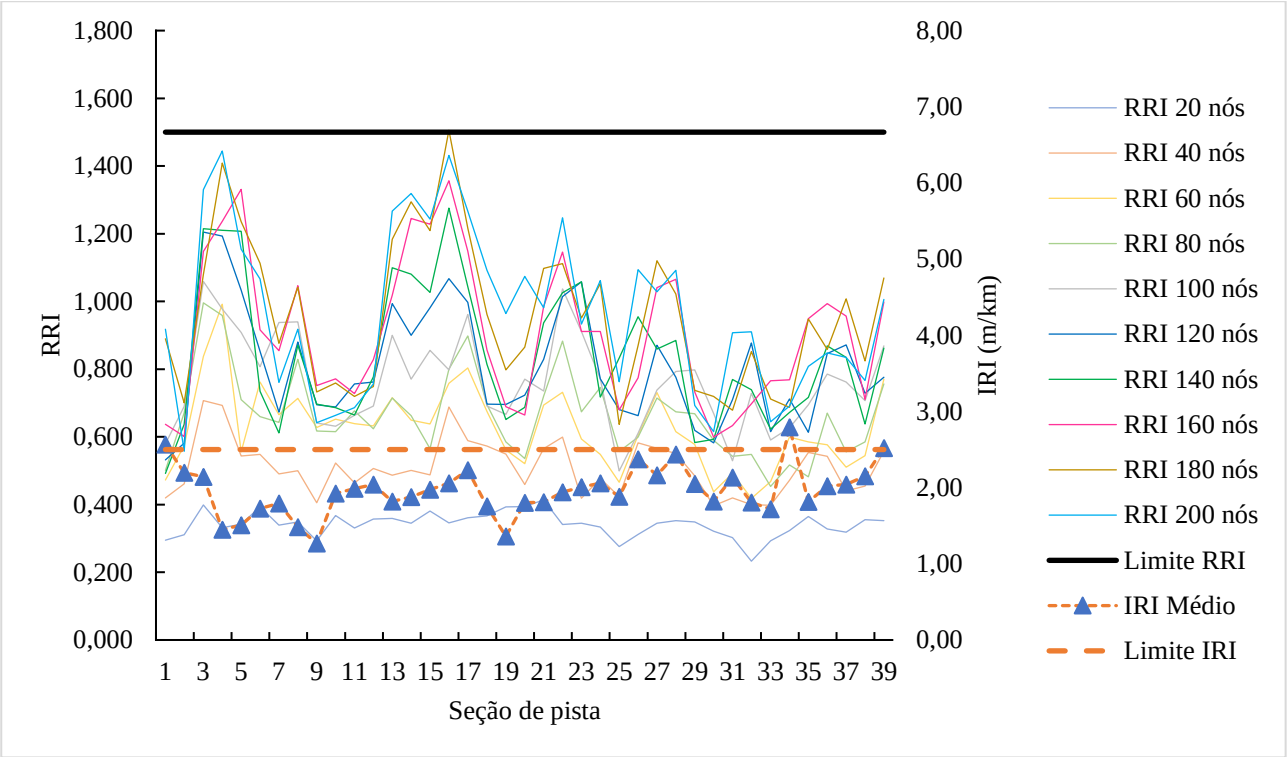


Gráfico 2 Valores de IRI e RRI para o conjunto de pistas de severidade Intermediário, para o B737-800

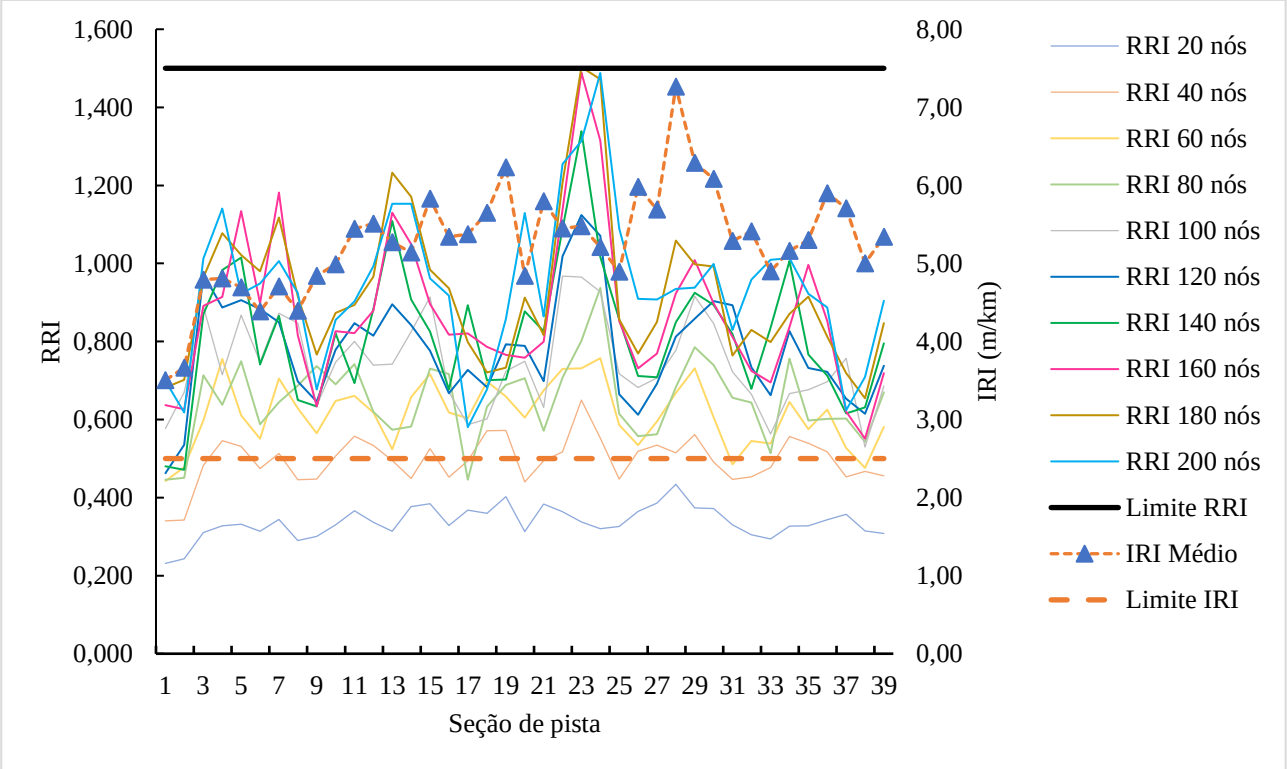


Gráfico 3 Valores de IRI e RRI para o conjunto de pistas de severidade Ruim, para o B737-800

No Gráfico 1, os valores médios para IRI não ultrapassaram o limite regulamentado pela ANAC (2021) de 2,5 m/km. Para os valores de RRI, eles foram crescentes conforme a acréscimo de velocidade da aeronave. Observou-se, também, que os picos dos valores de IRI coincidiram parcialmente com os picos de valores médios de RRI, o que indica uma aparente correlação ente os índices, para condições de baixa severidade de irregularidade longitudinal, o que aparenta reduzir-se com o aumento da severidade. Nos Gráfico 2 e Gráfico 3, os valores de IRI e RRI cresceram conforme o aumento da severidade da condição de

irregularidade longitudinal das pistas dos grupos Intermediário e Ruim. As tabelas 3, 4 e 5 expõem a comparação entre as correlações entre IRI e RRI para as aeronaves B737-800 e B747 SP e para as três condições de severidade de pista.

Tabela 3 Coeficiente de correlação (r) entre IRI e RRI, para as severidades e aeronaves avaliadas

Aeronave	*B737-800*			*B747 SP*		
Velocidade	*Bom*	*Intermediário*	*Ruim*	*Bom*	*Intermediário*	*Ruim*
20 nós	0,9246	0,8923	0,8716	0,8753	0,7602	0,7690
40 nós	0,9473	0,8620	0,5784	0,7702	0,5713	0,3258
60 nós	0,9204	0,7236	0,4060	0,7901	0,6815	0,3938
80 nós	0,8224	0,6569	0,3048	0,5019	0,6017	0,2207
100 nós	0,8314	0,6496	0,1826	0,7286	0,4882	0,1243
120 nós	0,7229	0,5835	0,2415	0,6905	0,4781	0,2144
140 nós	0,5775	0,4602	0,2457	0,5946	0,4546	0,2694
160 nós	0,6600	0,5035	0,1427	0,6196	0,4784	0,1869
180 nós	0,6217	0,4355	0,1209	0,6157	0,5035	0,1523
200 nós	0,7027	0,3405	0,0974	0,6349	0,5364	0,1302

Observando a Tabela 3, percebe-se que a correlação para a severidade Bom tem valores maior que para as outras severidades, como foi evidenciado na análise dos Gráfico 1,Gráfico *2* e Gráfico 3. Além disso, com o acréscimo da velocidade avaliada, a correlação decresce. Isso pode ser explicado pela natureza de elaboração do IRI, que foi desenvolvido para ser levantado por veículos a 80 km/h, velocidade diferente das que ocorrem nas pistas de aeroportos, e que foram estudados nesse trabalho, avaliando-se até 370 km/h.

Constata-se pelos Gráfico 1,Gráfico *2* e Gráfico 3, que houveram seções na qual valores de IRI ultrapassaram o limite regulamentado para ambos os grupos de severidade, cujas médias dos valores pelas velocidades alteraram-se pouco na comparação das duas severidades, e não ultrapassando o limite de RRI, como é exposto nas Tabela 4 e Tabela 5. Além disso, os picos de valores de IRI e RRI não são coincidentes, como observado no Gráfico 2 e Gráfico 3, reforçando as críticas da comunidade científica sobre o uso do IRI para avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários.

Com a avaliação dos valores de IRI observados, percebe-se que esse índice se comporta de forma mais conservadora em relação ao RRI, apontando a necessidade de M&R da pista por apresentar valores inaceitáveis conforme o limite regulamentado de 2,5 m/km (ANAC, 2021), enquanto as mesmas seções avaliadas por meio do RRI, não chegam ao patamar inaceitável do índice, fato esse mais evidente para as pistas de severidade Intermediário.

Tabela 4 Valores de RRI de conjunto de severidade Intermediário, para B737-800

Seção	*20 nós*	*40 nós*	*60 nós*	*80 nós*	*100 nós*	*120 nós*	*140 nós*	*160 nós*	*180 nós*	*200 nós*
1	0,2948	0,4198	0,4725	0,5013	0,579	0,5320	0,4920	0,6369	0,8893	0,9182
2	0,3113	0,4609	0,5738	0,6715	0,690	0,5814	0,6374	0,6008	0,7000	0,5577
3	0,3987	0,7071	0,8374	0,9958	1,059	1,2048	1,2147	1,1475	1,0793	1,3298
4	0,3315	0,6931	0,9919	0,9585	0,977	1,1929	1,2101	1,2369	1,4091	1,4444
5	0,3423	0,5432	0,5560	0,7103	0,908	1,0336	1,2069	1,3310	1,2359	1,1544
6	0,3933	0,5478	0,7623	0,6599	0,807	0,8528	0,7342	0,9158	1,1126	1,0666
7	0,3394	0,4903	0,6657	0,6424	0,938	0,6731	0,6117	0,8542	0,8764	0,7607
8	0,3488	0,5001	0,7136	0,8290	0,940	0,8804	0,8705	1,0461	1,0413	0,9178
9	0,2929	0,4057	0,6275	0,6168	0,641	0,6947	0,6967	0,7515	0,7323	0,6422
10	0,3680	0,5228	0,6523	0,6157	0,631	0,6882	0,6864	0,7717	0,7589	0,6636
11	0,3310	0,4637	0,6394	0,6771	0,663	0,7558	0,6644	0,7282	0,7190	0,6867
12	0,3572	0,5063	0,6322	0,6241	0,691	0,7615	0,7772	0,8283	0,7489	0,7566
13	0,3588	0,4871	0,7160	0,7144	0,900	0,9940	1,0994	1,0182	1,1835	1,2670
14	0,3450	0,5010	0,6493	0,6625	0,771	0,9001	1,0810	1,2448	1,2942	1,3193
15	0,3811	0,4879	0,6378	0,5650	0,856	0,9817	1,0267	1,2278	1,2094	1,2436
16	0,3456	0,6880	0,7584	0,7993	0,798	1,0676	1,2756	1,3565	1,5055	1,4317
17	0,3608	0,5892	0,8031	0,8984	0,961	0,9974	1,0437	1,1490	1,2168	1,2671
18	0,3662	0,5727	0,6754	0,6944	0,691	0,6966	0,8140	0,8563	0,9618	1,0921
19	0,3936	0,5492	0,5618	0,5850	0,667	0,6960	0,6508	0,6890	0,7979	0,9642
20	0,3944	0,4596	0,5213	0,5363	0,771	0,7235	0,6875	0,6642	0,8654	1,0737
21	0,4138	0,5653	0,6940	0,7202	0,736	0,8288	0,9369	0,9848	1,0973	0,9809
22	0,3416	0,5996	0,7313	0,8830	1,037	1,0143	1,0254	1,1462	1,1116	1,2468
23	0,3452	0,4190	0,5935	0,6742	0,911	1,0581	1,0578	0,9109	0,9511	0,9327
24	0,3335	0,4769	0,5483	0,7463	0,771	0,7715	0,7171	0,9110	1,0519	1,0617
25	0,2755	0,4232	0,4663	0,5569	0,499	0,6804	0,8331	0,6798	0,6368	0,7625
26	0,3123	0,5824	0,6048	0,5995	0,611	0,6627	0,9546	0,7741	0,8694	1,0938
27	0,3446	0,5661	0,7309	0,7151	0,738	0,8702	0,8592	1,0405	1,1206	1,0290
28	0,3529	0,5510	0,6158	0,6737	0,793	0,7764	0,8846	1,0654	1,0222	1,0924
29	0,3490	0,4847	0,5773	0,6682	0,798	0,6194	0,5830	0,7323	0,7378	0,6931
30	0,3212	0,3967	0,4372	0,5896	0,670	0,5825	0,5929	0,5992	0,7190	0,6155
31	0,3020	0,4198	0,4920	0,5428	0,530	0,7101	0,7692	0,6335	0,6787	0,9078
32	0,2328	0,3999	0,4182	0,5486	0,729	0,8777	0,7394	0,6981	0,8515	0,9099
33	0,2927	0,3983	0,4681	0,4536	0,590	0,6156	0,6230	0,7661	0,7121	0,6447
34	0,3233	0,4714	0,5995	0,5166	0,627	0,7118	0,6725	0,7690	0,6871	0,6910
35	0,3646	0,5537	0,5856	0,4816	0,695	0,6139	0,7167	0,9490	0,9481	0,8082
36	0,3277	0,5423	0,5764	0,6703	0,785	0,8459	0,8689	0,9934	0,8583	0,8478
37	0,3182	0,4407	0,5103	0,5558	0,761	0,8718	0,8348	0,9566	1,0078	0,8346
38	0,3552	0,4549	0,5447	0,5851	0,707	0,7289	0,6377	0,7111	0,8241	0,7670
39	0,3529	0,5578	0,7703	0,7564	0,869	0,7761	0,8624	0,9987	1,0689	1,0060

Tabela 5 Valores de RRI de conjunto de severidade Ruim, para B737-800

Seção	*20 nós*	*40 nós*	*60 nós*	*80 nós*	*100 nós*	*120 nós*	*140 nós*	*160 nós*	*180 nós*	*200 nós*
1	0,2314	0,3404	0,4424	0,4462	0,577	0,4625	0,4804	0,6369	0,6817	0,6989
2	0,2435	0,3425	0,4781	0,4508	0,670	0,5350	0,4712	0,6264	0,7015	0,6178
3	0,3107	0,4829	0,5977	0,7134	0,889	0,9717	0,8698	0,8915	0,9642	1,0125
4	0,3281	0,5461	0,7546	0,6378	0,715	0,8867	0,9829	0,9139	1,0771	1,1405
5	0,3321	0,5315	0,6109	0,7496	0,867	0,9059	1,0148	1,1340	1,0217	0,9227
6	0,3140	0,4742	0,5508	0,5874	0,747	0,8833	0,7414	0,8979	0,9800	0,9482
7	0,3444	0,5135	0,7049	0,6446	0,873	0,8492	0,8660	1,1812	1,1178	1,0061
8	0,2898	0,4460	0,6285	0,6870	0,847	0,6978	0,6502	0,8156	0,9155	0,9238
9	0,3003	0,4477	0,5649	0,7366	0,635	0,6460	0,6335	0,6333	0,7662	0,6768
10	0,3302	0,5062	0,6479	0,6899	0,747	0,7785	0,8208	0,8260	0,8735	0,8552
11	0,3660	0,5571	0,6607	0,7416	0,800	0,8471	0,6933	0,8213	0,8934	0,9027
12	0,3364	0,5334	0,6181	0,6194	0,739	0,8152	0,8830	0,8791	0,9661	0,9932
13	0,3141	0,4951	0,5238	0,5734	0,742	0,8955	1,1086	1,1296	1,2323	1,1528
14	0,3769	0,4489	0,6578	0,5819	0,825	0,8418	0,9073	1,0497	1,1710	1,1529
15	0,3846	0,5251	0,7168	0,7306	0,914	0,7764	0,8253	0,8961	0,9842	0,9619
16	0,3284	0,4522	0,6178	0,7167	0,671	0,6673	0,6769	0,8173	0,9362	0,9175
17	0,3681	0,4945	0,6034	0,4459	0,587	0,7270	0,8931	0,8207	0,7985	0,5804
18	0,3593	0,5712	0,6975	0,6329	0,601	0,6827	0,7010	0,7862	0,7204	0,6773
19	0,4026	0,5725	0,6592	0,6885	0,723	0,7931	0,7023	0,7657	0,7328	0,8579
20	0,3131	0,4402	0,6052	0,7060	0,749	0,7889	0,8769	0,7585	0,9128	1,1288
21	0,3836	0,4942	0,6748	0,5709	0,631	0,6984	0,8265	0,7992	0,8165	0,8644
22	0,3636	0,5173	0,7296	0,7078	0,967	1,0184	1,0889	1,1372	1,2070	1,2546
23	0,3374	0,6498	0,7308	0,8021	0,965	1,1239	1,3386	1,4889	1,5029	1,3136
24	0,3202	0,5527	0,7572	0,9371	0,927	1,0707	1,0167	1,3144	1,4718	1,4878
25	0,3263	0,4478	0,5862	0,6144	0,717	0,6651	0,8571	0,8528	0,8566	1,0897
26	0,3642	0,5191	0,5346	0,5574	0,682	0,6121	0,7115	0,7314	0,7694	0,9091
27	0,3860	0,5341	0,5947	0,5622	0,707	0,6919	0,7081	0,7694	0,8501	0,9080
28	0,4340	0,5143	0,6684	0,6829	0,778	0,8124	0,8492	0,9235	1,0587	0,9350
29	0,3737	0,5616	0,7312	0,7854	0,915	0,8582	0,9246	1,0088	0,9979	0,9379
30	0,3722	0,4913	0,6058	0,7394	0,846	0,9032	0,8933	0,8981	0,9923	0,9986
31	0,3303	0,4467	0,4854	0,6560	0,722	0,8930	0,8189	0,8112	0,7638	0,8297
32	0,3044	0,4531	0,5448	0,6432	0,665	0,7339	0,6788	0,7249	0,8295	0,9584
33	0,2942	0,4767	0,5389	0,5137	0,563	0,6626	0,8356	0,6948	0,7987	1,0092
34	0,3271	0,5568	0,6450	0,7562	0,667	0,8268	1,0057	0,8369	0,8706	1,0136
35	0,3275	0,5390	0,5753	0,5973	0,676	0,7321	0,7669	0,9961	0,9151	0,9225
36	0,3430	0,5168	0,6251	0,6017	0,697	0,7223	0,7124	0,8526	0,8121	0,8873
37	0,3575	0,4533	0,5271	0,6025	0,757	0,6531	0,6156	0,6204	0,7189	0,6239
38	0,3147	0,4673	0,4765	0,5423	0,530	0,6149	0,6310	0,5510	0,6545	0,7088
39	0,3077	0,4557	0,5815	0,6701	0,686	0,7376	0,7954	0,7187	0,8471	0,9044

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram feitas análises gráficas e estatísticas para relacionar valores de IRI, índice atualmente regulamentado no Brasil, e o RRI, índice que considera o *Weighted Root-Mean Square Vertical Accelerations at the Cockpit* - WtRMS-VACP), obtidos por meio de simulações do *software* ProFAA, para diferentes condições de severidade de irregularidade longitudinal e de velocidades desenvolvidas pelas aeronaves B737-800 e B747 SP. Os resultados indicam uma baixa correlação do IRI e RRI para velocidades maiores (acima de 148 km/h) para as condições de severidade Intermediária e Ruim de irregularidade longitudinal, evidenciando uma deficiência no IRI em explicar as variações de VACP em condições adversas.

Ainda, os resultados indicam que o IRI é um índice conservador, baseado na análise de seções pela classificação quanto à severidade da condição de irregularidade, divergindo da classificação de RRI nas condições Intermediária e Ruim, nos quais os picos de valores entre os índices foram divergentes. Valores de IRI para a condição Ruim foram superiores ao limite de 2,5 m/km, porém os dados observados de RRI, para a mesma condição, apresentaram diversas seções nas condições de manutenção geral e de programação de manutenção.

Dessa forma, verifica-se que há variações de aceleração vertical quando alterados os parâmetros de aeronave e velocidade desenvolvida, evidenciando as limitações do IRI na avaliação de irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários, visto que avalia apenas o perfil longitudinal da pista, e foi originalmente desenvolvido para ser utilizado no modo rodoviário. O uso de novos parâmetros de avaliação, como é o caso do RRI, ainda em desenvolvimento, ou a adaptação dos existentes ao ambiente a qual são utilizados, é necessário para o operador do aeródromo tomar decisões mais racionais quanto às estratégias de manutenção e reabilitação das pistas de pouso e decolagem.

Referências Bibliográficas

ANAC. (2021). *Regulamento Brasileiro de Aviação Civil N° 153: Aeródromos – Operação, Manutenção e Resposta à Emergências*. Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, RBAC n. 153, Emenda nº 06, Secretaria de Aviação Civil, Brasília.

ASTM. (2018). *Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements*. ASTM E1926 - 08. American Society of Testing and Materials. USA. DOI: 10.1520/E1926-08R15.

Cardoso, S. H.; Pinto, A. C.; Noronha, A.; Arruda, E.; Hércules, R. & Oliveira, A. S. (2018). Demonstration of the Non-Applicability of IRI as a Runway Roughness Indicator. In: *ALACPA XIV Seminar on Airport Pavements*. 28 slides.

Chen, Y. & Chou, C. (2004). Effects of Airport Pavement-Profile Wavelength on Aircraft Vertical Responses. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, D.C., 1989,83–93.

Durán, J. B. C. & Fernandes Jr., J. L. (2020). Airport pavement roughness evaluation based on cockpit and center of gravity vertical accelerations. *Revista Transportes*, v.28, n.1, p. 147–159.

Emery, S.; Hefer, A. & Horak, E. (2015). Roughness of Runways and Significance of Appropriate Specifications and Measurement. *11th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*. Sun City, África do Sul.

FAA. (2009). *Advisory Circular AC 150/5380-9: Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness*. Federal Aviation Administration. United States Department of Transportation. Washington, DC.

FAA. (2017). *Boeing 737-800 Final Surface Roughness Study Data Collection*. Final Report DOT/FAA/TC-18/8. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division. Atlantic City International Airport, New Jersey 08405.

FAA. (2020). *Airbus A330-200 Final Surface Roughness Study Data Collection*. Final Report DOT/FAA/TC-18/13. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division. Atlantic City International Airport, New Jersey 08405.

FAA. (2021). *New Index Testing and Verification—Runway Roughness Index. Final Report DOT/FAA/TC-21/32*. Federal Aviation Administration. William J. Hughes Technical Center. Aviation Research Division.

Gerardi, T. (2007). The impact of runway roughness in a high speed aborted takeoff, in *FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, New Jersey, USA.

Ling, J. M.; Liu, S. F.; Yuan, J. & Yang, W. C. (2017). Applicability of IRI based evaluation of airport pavement roughness. *Journal of Traffic Transportation Engineering*. v. 17, p. 20–27.

Liu S.; Tian Y.; Liu L.; Xiang P. & Zhang Z. (2021). Improvement of Boeing Bump Method Considering Aircraft Vibration Superposition Effect. *Applied Sciences*.; 11(5):2147.https://doi.org/10.3390/app11052147.

Loprencipe, G. & Zoccali, P. (2019). Comparison of methods for evaluating airport pavement roughness. *International Journal of Pavement Engineering*. V. 20, p. 782–791. https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1345554.

Morris, G. J. & Hall, A. W. (1965). Recent Studies of Runway Roughness. *Conference on Aircraft Operating Problems*: *A Compilation of the Papers Presented*. Langley Research Center. National Aeronautics and Space Administration, pp. 1-7.

Sayers, M., Gillespie, T. D., & Queiroz, C. (1986). *The International Road Roughness Experiment - Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements*. World Bank Technical Paper Number 45. Washington, D.C., USA.

Sayers, M. W. & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling: Basic Information About Measuring and Interpreting Road Profiles*. Universidade do Michigan, EUA.

Tian, Y.; Liu, S.; Liu, L. & Xiang, P. (2021). Optimization of International Roughness Index Model Parameters for Sustainable Runway. *Sustainability* 2021, 13, 2184. https://doi.org/10.3390/su13042184.

THE CHALLENGES OF TRANSPORTING SPECIAL LOADS IN MILITARY AND CIVIL AIRCRAFT

Pedro José Furlani Vidal[1,2]*, Rebecca Teles Ponte de Lima[1], Torben Allert[1]
[1]EMBRAER, São José dos Campos, SP, Brazil
[2]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brazil

*** Corresponding author e-mail address:** pedro.vidal@embraer.com.br

PAPER ID: SIT153

ABSTRACT

Military and civil air logistic missions may require the transportation of special cargo, that is, items that cannot be restrained to military or civil pallets per the according specification and that were not conceived to support aircraft vibration and load factors associated with different flight phases. Odd-sized loads are a common example of special cargo that require alternative restriction methods for a safe transportation. The objective of this work is to present different aspects and requirements to be considered for the restraining and transportation of special loads in military and civil air logistic missions, supporting the decision-making to transport it based on the benefits and the risks of the operation, illustrated by incident examples associated with poor special cargo conditioning inside the aircraft.

Keywords: Cargo Restraint, Airfreight Requirements, Incidents, Decision Making Criteria.

1. INTRODUCTION

Air freight is generally defined as any cargo transport operation in an aircraft that is not mail or that is not associated with a passenger's ticket (excluding items shipped under the cover of an airway bill) (Hui et al., 2004).

Air freight operations are carried out consistently both on civil and military aviation. Military airfreight operation has some variation from country to country, but share operation similarities. For example, in Brazil it consists of two different types of mission: strategical airlift and tactical airlift. The first one is associated with long-distance flights for transporting supplies and equipment (such as vehicles) between theaters of operation, which can be exemplified by airlift operations between military bases and humanitarian aid missions. The second one is associated with the transportation of supplies and equipment inside a theater of operation, requiring take off and landing from non-prepared or semi-prepared runways on occasion (Antunes et al., 2018).

Civil airfreight, performed either using the lower decks of passenger aircraft or through dedicated freighters, represents approximately 35% of world trade shipments by value, and is a key asset for the import and export of goods in a global market, meaning in general that countries with better air cargo connectivity also participate in more trade operations in value terms (Shepherd et al., 2016). Its importance was reaffirmed during the global COVID-19 pandemics, where the reduction in available passenger aircraft resulted in the air cargo capacity not being sufficient to accommodate cargo shipments once demand began to rebound, resulting in an accelerated passenger aircraft conversion to freighters (IATA, 2021b), exemplified in Brazil by ANAC's (Agência Nacional de Aviação Civil) resolutions number 600 and 639, allowing airlines to carry cargo in the cabin on an exceptional and temporary basis from December 2020 to July 2022 (ANAC, 2020, 2021). This scenario culminated in an estimated worldwide load factor of 53.9% for air freight in 2020, the highest value registered by IATA (International Air Transport Association) since 1990 (IATA, 2021b).

The majority of civil airfreight operations on wide-body aircraft are performed using ULDs (Unit Load Device) for restraining/containing the transported goods. ULDs may be defined as equipment used to load freight, such as standardized containers and pallets (Lu & Chen, 2011). On unusual circumstances, transported items in airfreight operation are called special cargo, that is, cargo that requires special handling and securing/restraining procedures but meeting limitations specified in the aircraft manuals and approved by the type certificate (TC/STC) (FAA, 2022), not being fully compatible with standard ULDs.

For military airfreight operation, loads considered special for civilian flights such as vehicles and smaller aircraft are routinely transported between bases. Military special loads are any cargo that may require special handling methods, contains hazardous material, operates during flight, or interfaces with aircraft non-cargo systems (Department of Defense, 2021). The term ULD is not normally associated with military pallets, such as the standard 463L pallet, which are largely used for transporting cargo in general, including special loads.

Safe restraint is fundamental for special loads, as they are commonly odd-sized and/or heavy; their movement inside the aircraft cargo compartment/cabin may result in catastrophic scenarios due to center of gravity (CG) shift. Load shift represents approximately 11% of accidents associated with cargo transport (Baxter & Wild, 2021).

The objective of this work is to present a general overview of special cargo freight operation, including different aspects and requirements to be considered for the restraining and transportation of special loads in military and civil air logistic missions, providing means to support the decision-making to transport them based on the benefits and the risks of the operation.

2. GENERAL REQUIREMENTS AND GOOD PRACTICES FOR THE AIR-FREIGHT OF GOODS

2.1. Military Airfreight

While military freight operations are not regulated by civilian authorities and therefore could have operational doctrines varying significantly between countries, it is usually observed that they share similarities worldwide as operational doctrines incorporate aspects from aircraft manuals.

Main steps for load preparation/transportation observed on operational doctrines are exemplified on AFI 24-605 Volume 2 Section C (Department of Defense, 2020) and may be summarized as follows:

- Clear and precise identification of the transported loads;
- Check the airworthiness of pallets through visual inspection;
- Check the airworthiness of tiedown equipment (TDE) such as nets, straps or chains used to secure the loads through visual inspection;
- Guarantee the correct cargo restraint by:
  - Calculating the correct amount of TDEs to be used considered the load weigh and aircraft load factors;
  - Not using a mix of TDEs from dissimilar material (metallic chains and webbing straps);
  - Knowing and respecting the rated loads of TDEs;
  - Attaching TDEs to cargo only at points that can withstand the respective TDE load;
  - Making cargo restraint and TDE disposition symmetrical;
- Weight and measure loads;
- Load the cargo inside the aircraft following the aircraft loading and weight & balance manuals.

These instructions show that cargo preparation/transportation are treated similarly to aircraft equipment, with associated airworthiness concerns, so that cargo movement is restrained for the entire flight envelope of the aircraft. As it is not reasonable for aircraft manufactures to access the virtually endless cargo restraint scenarios and possibilities, loadmasters and load riggers are key agents for guaranteeing safety of operation.

2.2. Civil Airfreight

Unlike the military operations scenario, civil airfreight does not have operational doctrines issued by a government authority prescribing adequate steps for load preparation and transportation.

In an effort to provide general guidelines for cargo aircraft operators and reduce safety-associated issues, the US Federal Aviation Administration (FAA) has issued guidelines for preparing, loading and restraining cargo on freighters. AC 120-85B (FAA, 2022), SAFO 13005 (FAA, 2013a) and SAFO 13008 (FAA, 2013b) detail the same key aspects observed in military operational doctrines, while emphasizing the importance of training regularly all personnel involved with weight and balance, cargo loading system (CLS) operators and cargo buildup/loading/unloading responsible, who perform similar tasks as military loadmasters and load riggers in guaranteeing the safety of operation of civil airfreight. AC 120-85B also defines the role of special cargo analysis function (SCAF), who assumes the responsibility of creating and applying procedures for the identification, acceptance, and carriage of special cargo considering for example the characteristics detailed on Section 3.

The aircraft industry also have important contributions in reducing dependency on operators' informal knowledge, improvisation and intuition, supporting more robust and organized efforts. IATA's ULD Regulations and SAE standards/recommended practices for ULDs are examples of relevant industry documentation associated with civil airfreight.

3. SPECIAL LOADS DEFINITION

The need to transport special loads is a reality for both military and civil operators, with similar definitions of what special loads are.

For Department of Defense (2021), a special load, also known as an air transportability problem item, is any system/equipment that in its shipping configuration may exceed standard size, weight, have fragile or hazardous characteristics, lack of adequate means for handling and restraint, or may require special support equipment. A cargo is considered a potential problem item when its design requirement includes transportability in such aircraft and the item exceeds any one of the aircraft general condition (cargo envelope, maximum weight, weight distribution, floor loading limits, etc). For US military operations, special loads require Air Transportability Test Loading Agency (ATTLA) evaluation and it may result in an internal air transport certification (Department of Defense, 2020).

In civil operations, IATA (2021a) defines special cargo as goods that may require specific procedures including packaging, labelling, documentation and handling through the transport chain. These specific procedures may be due to the cargo nature, weight, dimensions and/or value. FAA (2022) complements this definition by stating that the cargo and procedures should meet limitations specified in the aircraft manuals and TC/STC. While the general definition of special cargo by both entities is similar, IATA considers characteristics other than geometrical and weight for classifying a load as special cargo, such as dangerous goods and live animals; FAA, however, consider these items to be cargo requiring special handling procedures, but not special cargo. This paper focuses on the FAA special load definition as the basis for discussion.

4. THE CHALLENGES OF SPECIAL LOADS AIRFREIGHT

Knowledge of procedures and good practises: The process for a safe and secure loading/restraint of special loads start by having a solid base on the general process of cargo loading and preparation, so that loadmasters and SCAFs can differentiate standard loads from special loads. Based on the aircraft manuals and their previous knowledge, loadmasters/SCAFs will generate a procedure for preparing and restraining a specific special load.

This procedure will remain informal knowledge unless properly registered in the appropriate documentation as lessons learned. It is important that airfreight operators keep a systemic register of lessons learned, so that procedures are matured (instead of being reinvented) in case of recurring special loads freight, reducing safety concerns.

Cargo attachment points for restraint: It is common for special cargo not to have proper attachment points for straps and chains, making it difficult for loadmasters/SCAFs to elaborate a tiedown layout for its restraint. Existing attachment points with unknown resistance are equally problematic, and could fail mid-flight if tiedown loads surpass their capacity, resulting in cargo movement and CG shift. Resistance of an attachment point should not be inferred without proper data to support it.

Clearance to aircraft structure: The transport of out-sized cargo can be challenging during the handling procedure. The cargo entrance, specially in civil freighters that have lateral doors requires skilled personnel to guarantee that the aircraft will not be damaged during loading and positioning procedures. The reduced clearance also requires special care during restraint, as a cargo movement due to loose lashing may cause damage during flight.

Floor load limits: Aircraft loading manual (weight and balance manual, for civil operation) should ideally have clearly stated cargo floor load limits (or restrictions) to avoid any floor structure damage during loading, take-off, flight and landing at the interface between cargo and floor. Special loads often pose a challenge for load derivation due to asymmetry of geometry or weight distribution. Proper weighting of the special load using a scale (or set of scales) in fundamental for understanding how loads migrate to the aircraft floor, allowing for proper shoring calculation if better load distribution is required to meet floor structural limits.

Proper restraint of cargo: Calculating the correct amount of TDEs for restraining a cargo based on its weight/aircraft load factors and proposing a symmetric TDE layout are the basic procedure for any load restrain. These steps however might not be sufficient for odd-sized special cargo, whose shape may cause difficulties to rest the load in a

stable equilibrium on the aircraft floor/over a pallet. Rotations associated with poor load equilibrium may induce slack to lashings or chains, rendering load restrain less effective (or ineffective in worst cases). Load stabilization through shoring (if cleared by the aircraft loading manual) is usually an effective way to secure unstable loads, but on cases of excessively unstable loads or luxury items, custom cradles (that can support aircraft load factors) may be required for transporting the special load.

Safe of flight for special cargo: When transporting special loads, it is important to guarantee its integrity during flight, considering the associated load factors. Manufacturers/proprietaries of special items on occasion claim that a special load is proven for transportation based on previous transport experience on different modals such as road, rail and maritime transport.

This is not sufficient evidence for equipment safe of flight as load factors differ significantly between transport modes. Table 1 provides a general comparison for load factors in air, road, rail and sea transport, evidencing that aircraft ultimate load factors overwhelm the other modes of transport.

For military (MIL) transport, if people are in front of cargo, 9G forward restraint is recommended, based on 14 CFR 25.561 (FAA, 2002)/RBAC 25 (ANAC, 2022b) emergency load factors.

For civil application, 9G forward restraint is normally fulfilled by a barrier net or a barrier wall inside the cargo compartment to contain the movement of loads (or part of loads broken apart during an emergency landing) towards the aircraft cockpit, as civil freighters do not transport supernumeraries and cargo in the cabin except for the cases listed under 14 CFR 121.583 (FAA, 2007)/RBAC 121 (ANAC, 2022a); this is a key difference between civil and military freight transport operations.

Table 1 Comparison between air (SAE International, 2020; Department of Defense, 2021), road, rail and sea transport load factors (IMO et al., 2014)

Load Factor	Air		Road	Rail	Sea
	Civil*	MIL			
Forward	1.5G	3G	0.8G	0.5G	0.4G
After	1.5G	1.5G	0.5G	0.5G	0.4G
Up	2.5G	2G			
Down	5G	4.5G	1G	1G	1G
Lateral	1.5G	1.5G	0.5G	0.5G	0.8G

*Estimated based on A-size ULD 15,000 lb maximum weight and ultimate load criteria.

5. EXAMPLES OF OCCURRENCES RELATED TO SPECIAL LOADS POOR CONDITIONING/RESTRAINT

5.1. Soviet Navy's Tupolev Tu-104A Accident

Type of Operation: Military
Year: 1981
Deviation on: Knowledge of procedures and good practises, Proper restraint of cargo

A high profile flight from Pushkin Airport (ULLP, Russia) to Khabarovsk-Novy Airport (KHV/UHHH, Russia) transporting 44 passengers including 16 admirals and generals of the soviet navy crashed eight seconds after taking-off from the runway. Accident investigation pointed that one of the key points leading to the aircraft crash was CG variation due to cargo movement and passengers not respecting seating assignments (Bureau of Aircraft Accidents Archives, 2021; Ertsov & Fetisov, 2010).

Witnesses have stated that 500 kg paper rolls were loaded in the aircraft cargo compartment with an unknown restraint setup. Paper rolls (loaded at the last minute, according to witnesses) would have rolled to the rear part of the aircraft (Shigin et al., 2008), making aircraft CG exceed aft allowable limit by 4.7% of the MAC (mean aerodynamic chord) (Ertsov & Fetisov, 2010), pitching the aircraft up to a point of no recovery. The aircraft loaded with paper rolls is loosely illustrated in Figure 1, with possible paper roll positions.

Cylindrical loads such as paper rolls may be classified as special loads as rolls lack of adequate

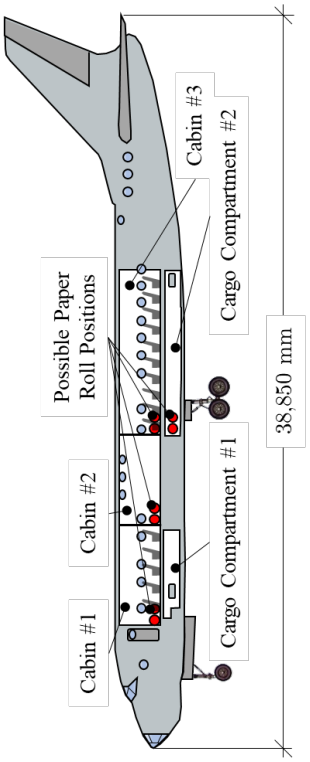


Figure 1 Tupolev Tu-104A - General Representation.

means for handling; and can be easily restrained on an unstable equilibrium when rigged, but move during take-off as a result of associated load factors and vibration. This accident exemplifies that poor restraint and cargo movement (which could have been noticed during load preparation and cargo compartment inspection prior to take-off) may result in loss of aircraft control.

5.2. National Air Cargo's Boeing 747-400 Accident

Type of Operation: Civil, transporting military payload
Year: 2013
Deviation on: Knowledge of procedures and good practises, Cargo attachment points for restraint, Proper restraint of cargo

A Boeing 747-400BCF (Boeing Converted Freighter) operated by National Air Cargo, Inc. crashed shortly after take-off from Bagram, Afghanistan. The aircraft was completely destroyed and all seven aircraft occupants were fatal victims.

The aircraft was transporting five mine-resistant ambush-protected (MRAP, two Cougar and three M-ATV) vehicles on pallets (Figure 2), considered special cargo as they could not be placed in ULDs or restrained in place using the the aircraft's cargo handling system. Instead, the cargo was restrained by straps attached to aircraft and by the cargo floor rollers, a condition named floating pallet (NTSB, 2015).

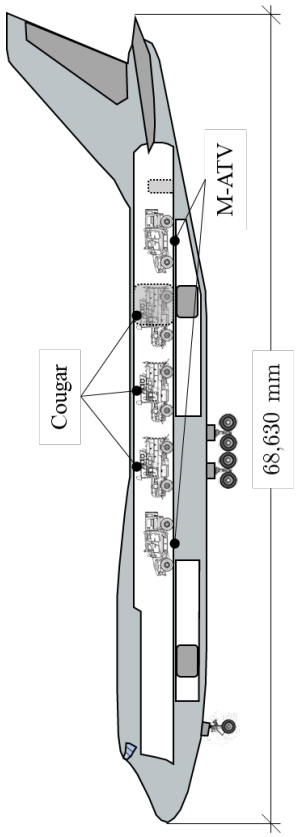


Figure 2 Boeing 747-400BCF - General Representation.

National Transportation Safety Board (NTSB) investigation shows that the likely accident cause was poor restraint of the cargo, which lead to at least one vehicle moving into the tail section of the airplane, damaging flight control components such that it was not possible for the flight crew to regain control of the airplane. Key issues observed for this airfreight operation was the operator's inadequate procedures for calculating the restraint of cargo, as well as the lack of knowledge on the allowable loads of both aircraft and cargo attachment points for TDEs, leading to undersized restraint of the vehicles that could not withstand the loads associated with take-off (NTSB, 2015).

NTSB investigation also identified a gap in terms of regulation, training and official documentation regarding special loads restraint and preparation, later discussed in FAA SAFO 13005, 13008 and AC 120-85B addressing important concerns observed during this investigation.

5.3. Everts Air Cargo's Douglas C-118A Liftmaster Accident

Type of Operation: Civil
Year: 2013
Deviation on: Proper restraint of cargo

The first officer of an Everts Air Cargo Douglas C-118A Liftmaster noticed an increase of stiffness in the airplane's elevator control movements. The aircraft was transporting a load of oversized, oil drilling tools to a oil production site. A cargo compartment inspection performed by the the flight engineer discovered that two 31-foot long oil drilling tools had shifted, damaging the aircraft's aft pressure bulkhead. Ground inspection showed that various frames, stringers and structural longerons received substantial damage as well. The aircraft crew reported that the likely accident cause was that at least one of the five straps securing the special load loosened during taxi/take-off, resulting in cargo movement. Movement was potentiated by the fact that the tools were covered in ice and snow (NTSB, 2014) .

This accident exemplifies the difficulties of restraining special loads when attachment points are not available on the cargo itself for connecting straps or chains. In conditions were TDEs are looped over equipment for restraining them inside the cargo compartment, unstable load equilibrium may result in loss of retention, as previously discussed on Section 4.

6. SUPPORTING DECISION MAKING FOR TRANSPORTING SPECIAL LOADS

Based on the challenges to transport special loads detailed on Section 4. as well as on the accidents associated with loose special cargo presented on Section 5., a checklist is proposed for initial assessment of a special load airfreight operation. The checklist is presented on Appendix A.

The proposed checklist goes over the general aspects of a safe transportation of a special load, while proposing corrective actions for simpler issues, or suggesting not to transport the evaluated load on cases where safety cannot be assured.

This checklist is meant to serve as a general guideline, therefore not being in any way exhaustive on all the possible scenarios and challenges a loadmaster/SCAF may find on airfreight operation. The aircraft operational manual is the most complete reference for instructions and guidelines, and should always be readily available for loadmasters.

7. CONCLUSION

As cargo is treated similarly to aircraft equipment, it is fundamental to guarantee its airworthiness through proper load preparation and restraint. Special loads pose additional challenge for loadmasters/SCAFs due to weight, geometry and/or lack of provisions for attaching proper restraint. It is important for freight companies and military forces to keep a well-registered and updated procedures documentation for special loads based on the rigging/loading solutions their loadmasters/SCAFs develop, allowing for repeatability and improvement of special loads handling processes.

Operators should avoid assuming premises or making educated guesses regarding general characteristics of the special load, as incidents/accidents could result in worst problems than the ones being solved with the freight operation.

8. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Mr. Guilherme Jarentchuk for his support on the translation of texts in Russian, which allowed for a richer discussion about the Soviet Navy's Tupolev Tu-104A Accident.

References

ANAC (2020). Resolução Nº 600. Brasilia, Brazil.

ANAC (2021). Resolução Nº 639. Brasilia, Brazil.

ANAC (2022a). Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Nº121 Emenda Nº15. Brasilia, Brazil.

ANAC (2022b). Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Nº25 Emenda Nº138. Brasilia, Brazil.

Antunes, J., Freitas, B., Oliva, L., Braga, L., Teixeira, M. & Durães, T. (2018). O Transporte Aéreo Estratégico na Força Aérea Brasileira: Considerações e Análise de Viabilidade. Anais do XV Congresso Acadêmico sobre Defesa Nacional, Ministry of Defense, Brazil.

Baxter, G. S. & Wild, G. (2021). Aviation safety, freight, and dangerous goods transport by air. R. Vickerman, ed. International Encyclopedia of Transportation, Elsevier Oxford pp. 98–107.

Bureau of Aircraft Accidents Archives (2021). Crash of a Tupolev TU-104A in Pushkin: 50 killed Retrieved Oct 10, 2022.
URL: *https://www.baaa-acro.com/crash/crash-tupolev-tu-104a-pushkin-50-killed*

Department of Defense (2020). Air Force Instruction 24-605 Volume 2: Air Transportation Operations. USA.

Department of Defense (2021). MIL-STD-1791D: Designing for Internal Aerial Delivery in Fixed Wing Aircraft. USA.

Ertsov, D. & Fetisov, A. (2010). The crash of the Tu-104A with the command of the Pacific Fleet on board at the Pushkin airfield Retrieved Oct 11, 2022.
URL: *http://war.airdisaster.ru/database.php?id=161*

FAA (2002). 14 CFR 25.561 Emergency Landing Condition – General. USA.

FAA (2007). 14 CFR 121.583 Carriage of persons without compliance with the passenger-carrying requirements of this part. USA.

FAA (2013a). Safety Alert for Operators 13005: Title 14 of the Code of Federal Regulations (14 CFR) Part 121Air Carriers Transporting Heavy Vehicle Special Cargo Loads. USA.

FAA (2013b). Safety Alert for Operators 13008: Part 121 Air Carriers Performing Special Cargo Loads Operations. USA.

FAA (2022). Advisory Circular 120-85B: Carriage of Cargo. USA.

Hui, G. W., Hui, Y. V. & Zhang, A. (2004). Analyzing china's air cargo flows and data., Journal of Air Transport Management 10(2), 125–135.

IATA (2021a). What types of cargo are transported by air?. Retrieved Aug 25, 2022.
URL: *https://www.iata.org/en/publications/newsletters/iata-knowledge-hub/what-types-of-cargo-are-transported-by-air/*

IATA (2021b). World Air Transport Statistics, Plus Edition., International Air Transport Association, Montreal, Canada.

IMO, ILO & UNECE (2014). Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units (CTU Code).

Lu, H.-A. & Chen, C.-Y. (2011). A time–space network model for unit load device stock planning in international airline services., Journal of Air Transport Management 17(2), 94–100.

NTSB (2014). ANC14CA012 Aviation Accident Final Report. USA.

NTSB (2015). NTSB/AAR-15/01 Steep Climb and Uncontrolled Descent During Takeoff National Air Cargo, Inc., dba National Airlines, Boeing 747 400 BCF, N949CA, Bagram, Afghanistan, April 29, 2013. USA.

SAE International (2020). AS36100C Air Cargo Unit Load Devices - Performance Requirements and Test Parameters. USA.

Shepherd, B., Shingal, A. & Raj, A. (2016). Value of air cargo: Air transport and global value chains. Technical report International Air Transport Association.
URL: *https://www.iata.org/contentassets/307646ccaf10488f9ee240c87d8f72dd/value-of-air-cargo-2016-report.pdf*

A GENERAL CHECKLIST FOR SPECIAL LOADS

Knowledge of procedures and good practices			
1.	Is the loadmaster trained in the general process of cargo preparation, loading and restraint?	□Yes	□No (A.1, A.2)
2.	Is the loadmaster trained in the process of cargo preparation, loading and restraint for special loads? Civil: knowledge of FAA SAFO 13005, 13008, AC 120-85B and company's training materials Military: according to the force's operational doctrine	□Yes	□No (A.1, A.2)
Note: It is suggested for the loadmaster to consult previous lessons learned associated with the transport of this type of special load prior to cargo preparation, loading and restraint, as well as registering any new lesson obtained from this operation.			
Safe of flight for special cargo			
3.	Has the special load been assessed by its manufacturer and/or supplier regarding its transportability by air considering the associated load factors? Load factors according to aircraft operational manual(s)	□Yes (skip 3.1)	□No (A.3)
3.1.	Does the special cargo inspection show any risk of components detaching with possibility of affecting weight and balance?	□Yes (A.0)	□No
Cargo attachment points for restraint, Proper restraint of cargo			
4.	Has the loadmaster assessed that force components from proposed TDEs meet the special load inertial forces for the associated load factors in all directions? Load factors according to aircraft operational manual(s)	□Yes	□No (A.4)
5.	Has the loadmaster assessed and approved the strength of the attachment points for TDEs at the aircraft for the proposed tiedown layout considering the associated load factors? Load factors according to aircraft operational manual(s)	□Yes	□No (A.4)
Between 6.1 and 6.2, choose the one that fits the special load rigging scenario inside the aircraft:			
6.1	Has the loadmaster assessed and approved the strength of the attachment points for TDEs at the special load for the proposed tiedown layout considering the associated load factors? Load factors according to aircraft operational manual(s); strength of payload hardpoints per manufacturer and/or supplier instructions	□Yes	□No (A.4)
6.2.	Can the special load be properly contained by standard TDEs (nets, straps, etc.) without the use of hardpoints at the cargo considering the associated load factors? Load factors according to aircraft operational manual(s)	□Yes	□No (A.0)
Clearance to aircraft structure			
7.	Does cargo clearance to aircraft structure respects the limits detailed on the aircraft operational manual?	□Yes	□No (A.0)
Floor load limits			
8.	Do the vertical inertial loads resulting from the payload weight and associated load factor meet floor load limits detailed on the aircraft operational manual? Load factors according to aircraft operational manual(s); For bulk loads, consider the use of shoring per operational manual(s) when necessary.	□Yes	□No (A.0)

Associated Actions:

A0. DO NOT TRANSPORT.

A1. Redo cargo preparation, loading and restraint with trained personnel.

A2. Freight company to review internal processes regarding preparation and availability of personnel.

A3. The freighter should not guarantee cargo proper functioning after delivery.

A4. Recalculate tiedown layout taking into consideration strength of the attachment points.

CAPACIDADE DA INFRAESTRUTURA TERRESTRE PARA MOBILIDADE AÉREA URBANA (UAM VERTIPORT): A PAPER REVIEW

Rodrigo Pintus Gonçalves da Costa*, Marcelo Xavier Guterres, Mayara Condé Rocha Murça, Anderson Ribeiro Correia
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica (PG-EIA)

*** Corresponding author e-mail adress:** rodrigopgc@icloud.com

PAPER ID: SIT134

RESUMO

Nos últimos 50 anos, o congestionamento do tráfego aumentou significativamente nas áreas metropolitanas (Mondschein et al, 2017) principalmente, devido ao crescimento populacional e sua concentração nas grandes cidades (Fadhil, 2018). Com o surgimento dos veículos elétricos de decolagem e pouso vertical - eVTOL e seu objetivo de amenizar o problema da mobilidade urbana de forma sustentável e acessível, a empresa Uber lançou em 2016 um whitepaper denominado Uber Elevate e organizou eventos internacionais, promovendo o desenvolvimento da nova indústria denominada Mobilidade Aérea Urbana – UAM, alegando ainda que o desafio operacional mais significativo da implementação da UAM é a deficiência da Infraestrutura Terrestre. Atualmente, apenas alguns estudos se concentram nos requisitos de infraestrutura terrestre para eVTOL (Alexander et al., 2017; Seeley, 2017a; Vascik et al., 2017; Antcliff et al., 2016). Por esta razão, este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise e discussão bibliográfica publicada criteriosamente selecionada, especificamente sobre o tema capacidade para a Infraestrutura Terrestre em UAM, a fim de subsidiar trabalhos futuros pela comunidade científica de transporte aéreo.

Keywords: UAM, eVTOL, TOLA, TLOF, VERTIPORT, VERTISTOP, VERTIHUB.

Nomenclaturas

A lista a seguir descreve abreviações que serão apresentadas neste trabalho.

AHP Método de Análise Hierárquica

AIAA Instituto Americano de Aeronáutica e Astronáutica

CAA Autoridade de Aviação Civil Canadense

CBD Distritos Empresariais Centrais de São Francisco EUA

CEAS Conselho das Sociedades Aeroespaciais Europeias

ConOps Conceitos de Operações

DES Modelo de Simulação de Eventos Discretos

eVTOL Aeronaves elétricas de Decolagem e Pouso na Vertical

FAA Administração Federal de Aviação dos EUA

FATO Área de aproximação final e decolagem

FIFO Primeiro a entrar, primeiro a sair

FLARM Dispositivo eletrônico para alertar em vôo sobre o risco de colisão com outra aeronave ou obstáculo

GATE Área ou stands de processamento de passageiros e serviços da aeronave

ICAO Organização Internacional da Aviação Civil

ICNS Conferência de Navegação e Vigilância de Comunicações Integradas

IEEE Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

IP Programação Inteira

MATSim Simulação de transporte multiagente

MITO Orquestrador de Transporte Microscópico

ODM Mobilidade Sob Demanda

pad Ponto de pouso e decolagem

SA Área de Segurança

SILO Orquestrador Simples de Uso do Solo

TAT TurnAround Time - Tempo operacional do conjunto de atividades que devem ocorrer entre um pouso e sua próxima decolagem

TLOF Ponto ou pad de pouso e decolagem

TOLA Área de pouso e decolagem

TTS Distância entre as extremidades dos rotores giratórios da aeronave

UAM Mobilidade Aérea Urbana

WLC Combinação Linear Ponderada

1. INTRODUÇÃO

O número de habitantes em áreas metropolitanas complexas aumentou e a população está cada vez mais dispersa em áreas periféricas em todo o mundo (Fadhil, 2018). Como resultado, as externalidades do congestionamento têm afetado cada vez mais as mesmas, reduzindo a produtividade, gerando perdas econômicas e impactos ambientais (Murça, 2021). Por outro lado, os recentes desenvolvimentos no campo da Mobilidade Aérea Urbana (UAM) (Ploetner et al., 2020) tem projetado um efeito substancial na economia (Rimjha & Trani, 2021).

Além disso, o Uber Elevate (Elevate, 2016) também afirmou em seu whitepaper que a limitação operacional mais significativa para iniciar a implementação do UAM em áreas metropolitanas é a falta de infraestrutura terrestre.

O termo Vertiporto denota infraestrutura terrestre de operação para aeronaves elétricas de Decolagem e Pouso na Vertical (eVTOL). Vascik e Hansman criaram vários Conceitos de Operações (ConOps) que requer um Vertiporto, sendo um local dedicado para a operação das aeronaves eVTOL tripuladas (Fadhil, 2018).

Este trabalho apresentará uma análise bibliográfica, descrevendo as principais contribuições e discutindo os resultados de trabalhos e artigos acadêmicos publicados sobre o tema de capacidade para Infraestrutura Terrestre da UAM, explorando os requisitos mínimos dos Vertiportos, dimensionamento de projeto de aeródromo, topologia e ConOps.

2. METODOLOGIA

O método elegido para este trabalho baseou-se na pesquisa e investigação de 200 artigos sobre UAM, nos quais foram filtrados 60 destes artigos relacionados com a Infraestrutura Terrestre. Como processo de triagem, foram selecionados os 4 principais trabalhos que abordam o tema capacidade de Vertiportos, considerando: o número de citações, a relevância do periódico e as recentes datas de publicação. Após a leitura e síntese destes, os resultados foram discutidos e analisados.

3. REVISÃO LITERÁRIA

A Mobilidade Aérea Urbana (UAM) implica em uma nova abordagem de transporte aéreo de passageiros e cargas em áreas metropolitanas, utilizando os novos veículos reconhecidos como aeronaves elétricas de Decolagem e Pouso na Vertical (eVTOL) (Murça, 2021). O objetivo deste conceito é fornecer transporte aéreo *door-to-door* seguro, acessível e ecologicamente sustentável utilizando as mesmas (Fadhil, 2018) operando em modo de Mobilidade Sob-Demanda (ODM) (Elevate, 2016). Alguns autores referem-se à infraestrutura terrestre da UAM como *Take-off and Landing Area* (TOLA), igualmente na literatura vários termos foram propostos, tais quais: Vertiporto, Vertipad, Pocket Airport, Skypark, Skynode e Skyport. (BAUM, 2021)

Neste trabalho, o termo Vertiporto é utilizado para representar uma área de terra, água ou construção, onde estima-se receber os movimentos de aeronaves eVTOLs. Com base na Circular Consultiva da Federal Aviation Administration (FAA) em convergência com a HeliExperts (Fadhil, 2018), o Uber Elevate apresentou três conceitos: Os dois primeiros, são construídos no topo de um edifício e em uma plataforma flutuante suspensa sobre a água, que funciona como Vertiporto (Elevate, 2016). O terceiro estaria dentro do trevo/rotatória de uma estrada/avenida como um Vertistop (Fadhil, 2018).

Os Requisitos Mínimos para a Infraestrutura Terrestre da UAM foram examinados por Fadhil (Fadhil, 2018) e proposto de forma semelhante aos heliportos, sendo que um Vertiporto deverá ser composto, ao menos, por uma área de *Touchdown and Lift off* (TLOF), uma área de aproximação final e decolagem (FATO) e uma área de segurança (SA). A tabela 1 resume as dimensões coletadas de diferentes trabalhos de pesquisa, artigos acadêmicos e diretrizes de melhores práticas apresentadas pelo autor mencionado.

Table 1 - Ref. de Dimensões para Vertiportos (Fadhil, 2018)

Conceito	*TLOF*	*FATO*	*SA*
Seeley (2017b)			162.16x 75m
Uber E. (2016)	15.24x 15.24m	35x35m	60.96m
Alex. et al. (2017)	13.72x 13.72m	21.34x 21.34m	30.48m
FAA (2012)	RD (Rotor Diameter)	1.5 D (overall Dimension)	
Vascik et al. (2017)	15.24x 15.24m		
ICAO (2009)	0.83D		0.25D
Syed et al. (2017)	13x13m	19.81x 19.81m	
Antcliff et al. (2016)	15.24x 15.24m	30.48x 30.48m	60.96m
Transport CA (2017)		1.5D	3m

O autor (Fadhil, 2018) também se refere ao TLOF como um espaço dentro do centro do ponto de pouso e decolagem (*pad*) que é utilizado como plataforma para facilitar o pouso da aeronave. Geralmente está localizado ao lado da FATO e oferece um *buffer* enquanto o equipamento se prepara para sair ou se aproximar da plataforma em um determinado ângulo de descida (*glideslope*). O SA é um espaço que fica do lado de fora dessas três zonas do pad.

Vaskin ilustra um TOLF pad baseado no Heliport Design recomendado pela FAA (2012) no AC 150/5390-2C (Vascik & Hansman, 2019), conforme mostrado na Figura 1.

Assim, o tamanho mínimo do TLOF foi considerado como apenas um "Tip-to-Tip Span" (TTS) que pode ser definido pelo "span (distância) entre as extremidades dos rotores giratórios ou *proprotors* da aeronave" (Vascik &

Hansman, 2019).

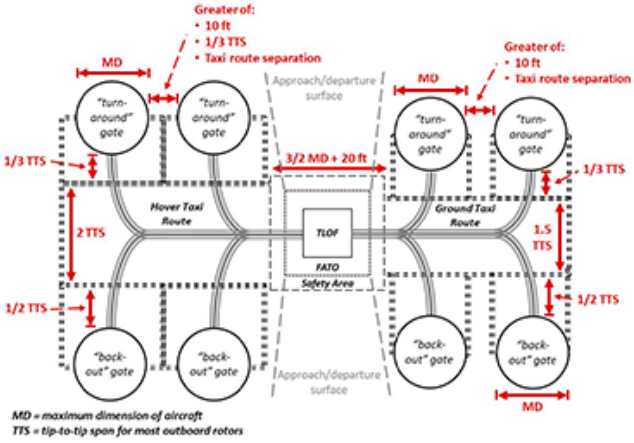


Figure 1 - Atributos de dimensionamento e espaçamento assumidos para vertiportos (Vascik & Hansman, 2019).

Alguns trabalhos analisados definem "Parking Stands", "Parking Stalls", "Parking Gates", "Staging Stands" ou apenas "Gate" (Fadhil, 2018) (Rimjha & Trani, 2021) para prover os serviços da aeronave, tais como: carregamento, abastecimento, manutenção e etc (Vascik & Hansman, 2019). Por ser uma área de processamento de passageiros (Ploetner et al., 2020), exigindo uma delimitação (*footprint*) menor que o TOLF, poderiam aumentar o perímetro total do Vertiporto (Rimjha & Trani, 2021).

Além disso, Vascik & Hansman (2019) mostra um exemplo de heliporto em Campo de Marte, São Paulo, representando uma topologia de "Pátio Remoto" na Figura 2, na qual um ou mais TOLF pads podem serem associados aos Gates distribuídos nas proximidades.



Figure 2 - Aeroporto Campo de Marte exibindo atributos de uma topologia de "Pátio Remoto" (Vascik & Hansman, 2019).

Rimjha & Trani (2021) argumentam que o número de TOLF pad e *stands* é um fator chave que afeta a capacidade do Vertiporto e descobriu-se que de 7 a 8 gates por pad pode ser uma "topologia potencialmente eficiente" (Rimjha & Trani, 2021) como mostrado na Figura 3.

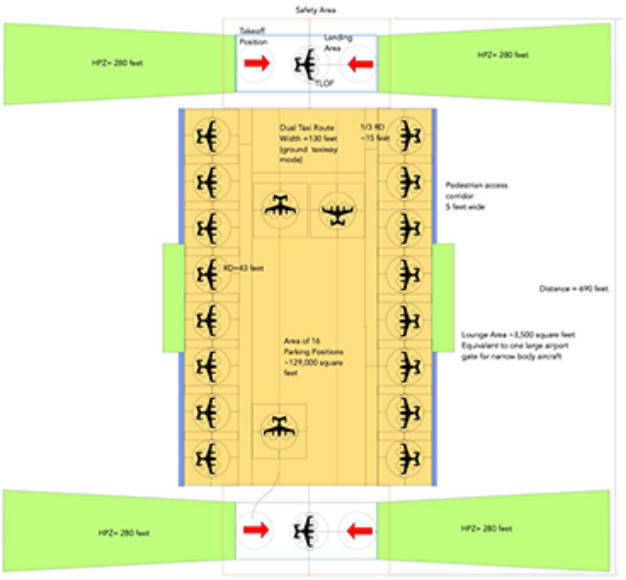


Figure 3 - Vertiport Design para configuração de 1pad-8gates (Rimjha & Trani, 2021).

Adicionalmente, um estudo publicado pelo consórcio formado por Embraer EVE, NATS, Heathrow Airport, London City Airport, Skyports, Atech, Volocopter, Vertical Aerospace e UK CAA argumenta que "as diferentes configurações do Vertiporto suportarão diferentes rendimentos (*throughputs*)" (Embraer Eve & CAA, 2022). Eles também defendem que a capacidade de um Vertiporto afetará a capacidade do sistema geral, impactando os seguintes processos de *ground handling* da aeronave e a capacidade do veículo, incluindo:

- tempo de ocupação do FATO (chegadas);
- tempo de ocupação do FATO (saída);
- Perfis de partida e chegada;
- Interação e separação da turbulência da esteira;
- Redução de ruído ou outros procedimentos específicos do espaço aéreo exigidos no Vertiporto; e
- Tempo de *turnaround* (TAT).

Um Conceito de Operações (ConOps) genérico para Vertiporto é proposto por Vascik & Hansman (2019), com base nas entrevistas, análise empírica das operações atuais e revisão dos padrões de heliporto examinados, enumerados a seguir.

1. As aeronaves chegam ao(s) TLOF pad(s) através do uso de procedimento(s) de aproximação;

2. Se o Vertiporto estiver equipado com Gates(s), então a aeronave pode taxiar/rolar do TLOF pad para um Gate disponível;

3. Se não existirem Gate(s) ou não estiver(em) disponível(is), pode ser possível realizar o pushback da aeronave no TLOF pad;

4. Exige um tempo mínimo de resposta para concluir as atividades, por ex. descarregar passageiros e bagagem, abastecer (recarregar) a aeronave etc;

5. Uma vez concluída, a aeronave pode taxiar/rolar para um TLOF pad e partir;

6. Se houver Staging Stands disponíveis (além dos Gates), as aeronaves podem ser preposicionadas; ou

7. As aeronaves podem ser retiradas de serviço e roladas para as áreas de espera.

Separadamente, os termos "Staging Stand" e "Gate" são descritos pelo mesmo autor. Onde o primeiro é uma área na qual a aeronave pode ser estacionada e atendida, embora não haja atividade de passageiros. Em contrapartida, o segundo ("posições de estacionamento " como definida pela FAA nas literaturas sobre heliporto) dever ser dimensionado para fornecer o mínimo de obstruções para manobras e estacionamento de aeronaves (Vascik & Hansman, 2019).

Fadhil (2018) também apresenta alguns fatores adicionais além das especificações mínimas para um Vertiporto indicados na Tabela 2.

O mesmo autor apresenta um estudo utilizando a Análise AHP-Delphi para determinar a Combinação Linear Ponderada (WLC), que poderia ser considerada para a escolha da localização onde os Vertiportos serão construídos. Os quatro aspectos principais estão listados abaixo (Fadhil, 2018):

- Ponto de Interesse;
- Renda Média;
- Custo Médio Total de Transporte; e
- Hub de Transporte Principal.

Table 2 - Requisitos Min. para Vertiportos (Fadhil, 2018)

Fatores	*Requisitos mínimos*
Estação de carregamento	Carga de 400 kW por 5 minutos a taxas de 2C (2A/30 minutos).
Barulho	Toque de recolher noturno; e Espaçamento adequado de "helideck".
Clima	Caminhos de aproximação/decolagem bem projetados permitem que os pilotos evitem condições de vento a favor e minimizem o vento cruzado; "Windcone" iluminado; e Pavimento aquecido do "helipad" e acesso de passageiros.
Risco de incêndio	Sem combustível ou fluidos significam risco reduzido de incêndio.
Com.	Transmissão de estação terrestre ADS-B e receptor FLARM.
Esta.	Depo/Garagem para eVTOL ocioso, bem distribuído e adequado para armazenar toda a areonave; e rebocador ou trilho de guia com controle remoto.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção descreve uma breve análise e discussão das contribuições dos principais trabalhos acadêmicos selecionados sobre o tema de Infraestrutura Terrestre para UAM em relação a capacidade dos Vertiportos, devidamente compilados e organizados nas subseções a seguir.

4.1. DESENVOLVIMENTO DE ENVELOPES DE CAPACIDADE PARA VERTIPORTO E ANÁLISE DE SUA SENSIBILIDADE A FATORES TOPOLÓGICOS E OPERACIONAIS

Palavras-chave: *Denver International Airport; Urban Air Mobility; Taxi Way; Vertical Takeoff and Landing; Model Aircraft; Controlled Airspace; Helicopters; Satellites; Airfields; e Air Traffic Control.*

Neste trabalho, publicado pela AIAA Scitech Forum, EUA, os autores Vascik & Hansman (2019) utilizam a formulação de Programação Inteira (IP) das operações do Vertiporto para desenvolver envelopes de capacidade de *through-*

put e esquemas operacionais eficientes, considerando as variáveis de infraestrutura, por exemplo: "TLOF Pads", "Gates" e "Staging Stands", também os Parâmetros Operacionais baseado em um ConOps genérico para Vertiporto descritos a priori, considerando: Hora de Chegada, Hora de Partida, Hora de Táxi no Portão, Hora de Táxi do Ponto de Parada, Tempo de Turnaround, Número de Aeronaves Pré-estadia e Políticas de Operações Simultâneas.

Este estudo tem como objetivo responder as três questões a seguir:

- Quais variáveis de infraestrutura e parâmetros operacionais a taxa de transferência da Vertiport é mais sensível?
- Quais variáveis de infraestrutura e parâmetros operacionais apresentam influência correlacionada ao rendimento? e
- Quais topologias de vertiporto maximizam a taxa de transferência para um determinado cenário de área de cobertura e parâmetro?

Como contribuição propõem um Modelo de fluxo de rede das operações do Vertiporto aplicado ao IP baseado na formulação de fluxo de multiproduto Bertsimas-Stock proposta para gerenciamento de fluxo de tráfego e devidamente generalizado em 5 equações descritas a seguir segundo (Vascik & Hansman, 2019):

- **Função Objetivo:** Maximizar o valor total atribuído para chegadas e partidas de aeronaves;
- **Restrição de conservação de fluxo:** para cada produto, o fluxo em cada nó mais o fluxo de entrada externo é igual ao fluxo de saída;
- **Restrição de conflito TLOF:** apenas uma aeronave pode estar nos arcos de aproximação;
- **Restrição de conflito de portão:** apenas uma aeronave pode estar nos arcos de taxi-in, taxi-out, staging taxi-in/out, turnaround ou hold para cada nó do portão de cada vez;
- **Restrição de Capacidade do Arco:** a soma do fluxo de todos os produtos de aeronaves em cada arco deve ser menor ou igual à capacidade daquele arco; e
- **Restrição de número inteiro positivo:** as variáveis de decisão devem ser não negativas e inteiras.

Como resultado do trabalho o autor apresenta as implicações do estudo sensível ao envelope de capacidade do Vertiporto para realizar e projetar as quatro classes de topologia: Satélite, Píer, Linear e Remoto.

Avalia-se que o ponto mais importante dessa obra está nas conclusões dos parâmetros operacionais que afetam a relação entre Gates e TLOF pads (Gates:TOLF pads) e as consequências de um layout ineficiente e eficiente, como demonstrado pelo autor e listado abaixo (Vascik & Hansman, 2019):

Ineficiente:

- Poucas Gates por TLOF pad = a diminuição significativa da taxa de transferência; e
- Muitos Gates por TLOF pad = possui pouca influência no rendimento, mas um impacto significativo nas dimensões do Vertiporto e na sua eficiência operacional.

Eficiente:

- O horário de chegada ou partida reduz o número de Gates exigidos por TLOF pad;
- O tempo de retorno do veículo aumenta o número de Gates exigidos por TLOF pad; e
- O tempo de táxi entre o TLOF pads e os Gates pode diminuir o número de Gates necessários por TLOF pad, dependendo dos procedimentos operacionais simultâneos.

4.2. POTENCIAL DE APLICAÇÃO A LONGO PRAZO DA MOBILIDADE AÉREA URBANA COMPLEMENTANDO O TRANSPORTE PÚBLICO: UM EXEMPLO DA ALTA BAVIERA

Palavras-chave: *Simulation; Modelling; MATSim; Agent-based; e Simulation.*

Este artigo, publicado pelo CEAS Aeronautical Journal, os autores Ploetner et al. (2020) definem um modelo incremental e métodos específicos para quantificar e simular a demanda potencial da UAM para complementar o transporte público, aplicados à região metropolitana de Munique, Alemanha. A fim de investigar o potencial

de aplicação a longo prazo da Mobilidade Aérea Urbana na região da Alta Baviera.

As contribuições identificadas nesse trabalho foram (Ploetner et al., 2020):

- A demanda de viagem modelada pelo modelo baseado em agente e em viagem, *Microscopic Transportation Orchestrator* (MITO) e MATSim aplicados a uma demanda de transporte esperada entre 2011 e 2030 por meio de outro modelo *Simple Land Use Orchestrator* (SILO) e modelo Logit multinominal que leva em consideração o orçamento de tempo de viagem restante; e
- Uma simulação de missão de referência considerando no mínimo 74 Vertiportos, com diferentes densidades de rede, velocidades de veículos, tarifa e estrutura de tarifa.

Entre os resultados apresentados a partir das simulações realizadas pelo autor deste trabalho, foram descritas somente as que possuem relação com o tema deste *paper review* (Ploetner et al., 2020):

- O número de veículos por Vertiporto e, portanto, o número total de veículos na rede de transporte UAM tem um impacto muito alto na demanda da UAM e seu compartilhamento modal;
- Quando a demanda excedeu a oferta de passageiros (por exemplo, número de veículos disponíveis para atender a demanda), foram observados tempos de espera adicionais dos mesmos;
- Pode ser demonstrado que os tempos de processamento de passageiros nos Vertiportos de 30 min têm um impacto significativo;
- O número de veículos por Vertiporto também tem um impacto muito alto e, portanto, a oferta geral de transporte da UAM; e
- A demanda excede a oferta no caso de 10 a 20 veículos por Vertiporto, enquanto a demanda é quase coberta nos 100 veículos em cada. No entanto, o manuseio (desembarque, limpeza, recarga) de mais de 20 veículos simultaneamente em solo por estação pode ser desafiador.

4.3. CAPACIDADE E RENDIMENTO DE VERTIPORTOS PARA MOBILIDADE AÉREA URBANA COM UM ALGORITMO DE AGENDAMENTO POR ORDEM DE CHEGADA

Palavras-chave: *Throughput; Urban Air Mobility; Airspace Region; Unmanned Aircraft Systems Traffic Management; Aviation Technology, Integration, and Operations; Service Oriented Architectures; National Airspace System; Takeoff and Landing; Cumulative Distribution Function; e Heliports*

Como principal contribuição esse artigo publicado pela AIAA AVIATION Forum, EUA, os autores Guerreiro et al. (2020) conceberam um modelo teórico que permite estimar a capacidade de várias configurações de Vertiportos agnóstico ao seu layout, para avaliar e comparar a capacidade e a taxa de transferência do Vertiporto utilizando uma abordagem de enfileiramento por ordem de chegada, bem como um cenário de demanda UAM simulado.

Como resultado dessa pesquisa foi possível identificar segundo o autor (Guerreiro et al., 2020):

- O modelo teórico forneceu uma compreensão das condições que podem levar a um Vertiporto limitado a vagas de estacionamento ou a um ped limitado;
- Este limite depende da razão entre o tempo de superfície pelo o tempo de pad usado por um veículo em um Vertiporto;
- Os modelos revelaram que a abordagem de escalonamento por ordem de chegada pode apresentar ineficiências no uso dos recursos de Vertiporto;
- Porém, o modelo apresentado pode capturar 80% ou melhor taxa de transferência para capacidade na maioria dos casos e pode ser a única alternativa adequada em operações UAM sob demanda; e
- A disponibilidade de alguns horários não utilizados nas linhas do tempo do pad pode fornecer um mecanismo útil pelo qual as operações podem ser ajustadas ligeiramente para suportar condições fora do nominal.

4.4. MOBILIDADE AÉREA URBANA: FATORES QUE AFETAM A CAPACIDADE DO VERTIPORTO

Palavras-chave: *Schedules; Sensitivity; Navigation; Surveillance; Urban areas; Transportation; e FAA*

Esta pesquisa, publicada em 2021 pela IEEE-ICNS, nos EUA, conduzida pelos autores Rimjha & Trani (2021) analisa os fatores críticos que impactam a capacidade do Vertiporto, utilizando um modelo de Simulação de Eventos Discretos (DES) desenvolvido com o software MATLAB para simular as operações da UAM e definir a sua capacidade. Além disso, foi planejado para ser posicionado nos Distritos Empresariais Centrais de São Francisco (CBD), projetados com 1, 2 ou 3 plataformas de pouso (TLOF pad) e 8, 16 ou 24 vagas de estacionamento (gates), respectivamente.

A contribuição desta obra está na apresentação de um modelo de simulação que fornece métricas de capacidade do Vertiporto para operações equilibradas de chegada e partida, induzidas a partir de uma distribuição de "*Poisson*". Essa análise discreta considera: o Vertiporto como um sistema e as operações (chegadas e saídas) como entidades; Essas entidades podem se mover pelo sistema e alterar seu estado; As plataformas de pouso (TOLF pad) e os Gates são considerados recursos; as aeronaves UAM dentro do ambiente são recursos modificados; e por fim o sistema possui três filas em *First-In-First-Out* (FIFO) (Rimjha & Trani, 2021).

A principais conclusões avaliadas como importantes que esse trabalho traz a lúmen são (Rimjha & Trani, 2021):

- O desequilíbrio entre os horários de solicitação de chegada e os horários de solicitação de saída pode impactar na operação do transporte de passageiros que um Vertiporto movimenta;
- Disponibilidade de aeronaves UAM e o horário de partida estão intimamente ligados;
- Durante o horário de pico de chegada, a diferença consistente entre o total de veículos UAM no solo e os veículos disponíveis pode ser explicada pelo tempo de serviço programado antes do UAM ser considerado disponível para partidas;
- Seriam necessários ao mínimo 4 TOLF pads e 36 gates para atender a demanda simulada para o Vertiporto sem descartar nenhuma operação; e
- Devido ao problema de espaço disponível, o autor recomenda que talvez, o Vertiporto pudesse ser dividido em dois menores (2 TOLF pads / 18 gates).

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma revisão literária, abordando os conceitos de capacidade de infraestrutura terrestre da UAM (Vertiportos), descrevendo as definições, tais como: aeronaves elétricas *Vertical Take-Off and Landing* (eVTOL); *Take-off and Landing Area* (TOLA); área de pouso e decolagem (TLOF pad); uma área de aproximação final e decolagem (FATO); uma Área de Segurança (SA); *Tip-to-Tip Span* (TTS); e *Staging Stands* (Gates).

Foram descritos os requisitos mínimos das topologias, dimensionamento, design do Vertiportos e um conceito de operações genérico (ConOps).

Finalmente, apresentou uma análise bibliográfica, descrevendo as principais contribuições e destacando os resultados mais relevantes dos trabalhos e artigos acadêmicos publicados sobre o tema capacidade para Infraestrutura Terrestre da UAM.

Referências

BAUM, D. M. (2021). Airspace capacity artificial intelligence model in uam environment based on the airspace complexity, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Elevate, U. (2016). Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation `https://bit.ly/3rl5Xej`.

Embraer Eve, NATS, H. A. L. C. A. S. A. V. V. A.

& CAA, U. (2022). Uk consortium completes urban air mobility concept of operations for the civil aviation authority https://bit.ly/3O4aJGO.

Fadhil, D. N. (2018). A GIS-based Analysis for Selecting Ground Infrastructure Locations for Urban Air Mobility, Dissertação de Mestrado, Technical University of Munich, Munich.

Guerreiro, N. M., Hagen, G. E., Maddalon, J. M. & Butler, R. W. (2020). Capacity and Throughput of Urban Air Mobility vertiports with a First-Come, First-Served Vertiport scheduling algorithm, AIAA Aviation 2020 Forum.

Murça, M. C. R. (2021). Identification and prediction of urban airspace availability for emerging air mobility operations, Transportation Research.

Ploetner, K., Al Haddad, C., Antoniou, C., Frank, F., Fu, M., Kabel, S., Llorca, C., Moeckel, R., Moreno, A. & Pukhova, A. (2020). Long-term application potential of urban air mobility complementing public transport: an upper Bavaria example, CEAS Aeronautical Journal.

Rimjha, M. & Trani, A. (2021). Urban Air Mobility: Factors Affecting Vertiport Capacity, 2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)pp. 1–14.

Vascik, P. D. & Hansman, R. J. (2019). Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors, AIAA Scitech 2019 Forumpp. 5–26.

MODELAGEM DO PROBLEMA DA ALOCAÇÃO DE FROTA APLICADO NA AVIAÇÃO REGIONAL BRASILEIRA A PARTIR DE FERRAMENTAS DA PESQUISA OPERACIONAL

Julia Ribeiro Felipe[1], Mateus Rodrigues Miranda[2], Victor Rafael Rezende Celestino[3]
Universidade de Brasília

[1]**e-mail**: juliaribeirofelipe@gmail.com

[2]**e-mail**: mateusmiranda@unb.br

[3]**e-mail**: vrcelestino@unb.br

PAPER ID: SIT156

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo principal a elaboração de uma malha aérea ótima aplicada unicamente a serviços de aviação regional brasileira a partir da resolução do Problema de Alocação de Frota (FAP) considerando 6 tipos de aeronaves (jatos e turboélices) para diferentes rotas aéreas passando por 12 hubs espalhados pelo Brasil. A malha foi confeccionada a partir de recursos existentes no campo da Pesquisa Operacional (PO) aplicados a um algoritmo escrito em Python com o auxílio das bibliotecas Numpy e Pandas além do framework PulP. Para a elaboração do trabalho utilizou-se de uma modelagem previamente desenvolvida por outros pesquisadores e optou-se pelo foco inicial na redução da complexidade computacional da rotina de programação pré-existente, o que possibilitou novas análises para a pesquisa. Para as alterações citadas, foi introduzido um intervalo de tolerância na solução do problema de PO a fim de reduzir o tempo de execução do algoritmo e permitir diferentes testes e combinações das aeronaves selecionadas. Por fim, foram realizadas alterações no modelo matemático referentes ao cálculo do CASK (*Cost per Avaliable Set Kilometer*) com o objetivo de aproximar os resultados do obtidos à realidade da indústria brasileira considerando as características de cada uma das aeronaves atualizadas.

Palavras-chave: Aviação Regional, Problema de Alocação de Frota, Pesquisa operacional, Python, PulP.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos deste trabalho vão, para os colegas Thiago de Jesus e Gustavo Pereira que já se dedicaram ao tema desenvolvido anteriormente. Além disso, estende-se os pedidos de gratidão para integrantes da indústria que auxiliaram em reuniões realizadas ao longo da confecção da pesquisa.

INTRODUÇÃO

Por definição, considera-se aviação regional atividades regulares em rotas com menor densidade de tráfego. Sendo assim, o incentivo a esta modalidade pode funcionar como fomento para eventos culturais, turísticos e empresariais em cidades de menor porte, consequentemente impulsionando o desenvolvimento econômico de várias localidades brasileiras (Bettini, 2007)

A partir da importância do desenvolvimento do segmento, entende-se a também a relevância de investimentos em estudos científicos focados nas possibilidades da modalidade para o cenário da indústria do país. Foi verificada a existência de trabalhos anteriores que tratam o tema sob a mesma abordagem desenvolvido por (Jesus, 2019) e (Pereira, 2021).

Porém verifica-se a necessidade de expandir o modelo previamente desenvolvido superando limitações computacionais e conceituais. Partindo dessa ideia, tem-se a questão principal: qual seria a melhor forma de alocação de diferentes modelos de aeronaves aplicadas ao cenário de rotas aéreas regionais tendo como foco todo o território brasileiro?

Assim sendo, este estudo tem por objetivo a modelagem matemática de uma malha aérea ótima aplicada à aviação regional no Brasil utilizando seis tipos de aeronaves, considerando o cenário do setor de transporte aéreo pós-pandemia da Covid-19 e as limitações computacionais existentes para a elaboração da pesquisa a partir da modelagem matemática pré-existente desenvolvida pelos pesquisadores (Jesus, 2019) e (Pereira, 2021). Para isto, utilizou-se o Problema da Alocação de Frota (FAP), do inglês *Fleet Assignment Problem*, e a metodologia de Pesquisa Operacional como ferramentas para a tomada de decisões na elaboração do trabalho.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 INDCADORES DA AVIAÇÃO

Para a construção da modelagem matemática é preciso compreender o significado de alguns indicadores da aviação. O primeiro a ser investigado é o indicador de RPK (do inglês *Revenue Passinhem Kilometers*), cujo significado está relacionado à receita por passageiros por quilômetro voado. Também utilizado na construção da modelagem matemática utilizada encontra-se o ASK (*Available Seat Kilometer*), referente à quantidade de assentos disponíveis por quilômetro (ANAC, 2022).

Outro ponto de referência para a modelagem matemática foi o indicador de *Yield*, que representa a receita da companhia por assento vendido a cada quilômetro voado. Por fim, CASK (do inglês, *Cost per Avaliable Seat Kilometer*), referente ao custo de se voar um assento por um quilômetro. O cálculo do indicador pode ser realizado de diferentes formas, considerando diferentes fatores, sendo inclusive considerado um segredo de

vantagem competitiva para companhias aéreas (Fregnani, 2019)

1.2 MALHAS AÉREAS

Define-se como malha aérea, o conjunto de rotas (origem-destino) de uma determinada companhia aérea, essa organização pode acontecer de diferentes formas. Existem várias configurações existentes para a operação de voos em uma determinada companhia aérea sendo uma delas a malha aérea do tipo *hub-and-spoke*, utilizada para a pesquisa.

Nessa modalidade são escolhidos centros de conexão, os chamados *hubs*, ou seja, os passageiros viajam de diferentes pontos para os *hubs* e de lá embarcam novamente para seus destinos finais. A opção pelo formato de se deu devido a sua adequação à aviação regional brasileira e suas características gerais como a demanda de passageiros (Lederer, 1998)

1.3 PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO) é uma ferramenta para a alocação de recursos de uma produção. São consideradas etapas da modelagem de um processo pautado em PO: identificação do problema, formulação de objetivos e análises de limitações e alternativas. Ou seja, a partir da identificação do problema busca-se a modelagem matemática representativa da realidade do sistema que, ao ser completamente resolvido, deve indicar a melhor forma de alocação de recursos considerando o contexto ao qual o modelo está inserido (Rodrigues, 2013)

Existem diferentes formas matemáticas para a abordagem de um determinado modelo, que são escolhidas a depender da complexidade do sistema e também dos recursos matemáticos e computacionais disponíveis. Dentre as diferentes estratégias para a resolução de problemas de Pesquisa Operacional, decidiu-se pela aplicação da programação mista linear inteira (MILP – *Mixed Integer Linear Programming*).

1.4 COMPLEXIDADE COMPUTACIONAL NA PROGRAMAÇÃO INTEIRA

A elaboração de um modelo que possua um nível de complexidade computacional compatível com as máquinas envolvidas é um fator bastante importante para o projeto e para a construção da metodologia em si. A capacidade de memória dos computadores utilizados para a resolução do algoritmo pode influenciar no resultado final, uma vez que um modelo muito complexo pode refletir na impossibilidade de convergência de um problema, assim como afirmado por (Pereira, 2021) sobre o Problema de Alocação de Frota (FAP) em questão.

A fim de adequar a exigência computacional de um determinado modelo às máquinas disponíveis existem algumas possibilidades, dentre elas: o aumento do

número de restrições, a alteração dos critérios de convergência da solução, entre outros. Essas mudanças podem reduzir o número de iterações do algoritmo, permitindo que a resolução do problema (Hiller & Lieberman, 2013)

Outra possibilidade seria acrescentar ao algoritmo um intervalo de otimalidade, que representa uma margem de tolerância entre soluções para a função objetivo entre diferentes cenários, tendo como ponto inicial da análise a solução "relaxada" do problema, que representa uma resposta sem consideração da restrição inteira da modelagem. É possível que o usuário determine a distância limite entre as propostas, possibilitando assim a estimação de uma solução adequada para o modelo (Ajayi, Thomas, & Schaefer, 2021).

1.5 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE FROTA

Basicamente, define-se o Problema da Alocação de Frota, do inglês, *Fleet Assigment Problem* (FAP) como o ato de realizar a alocação de aeronaves para as rotas de uma determinada companhia aérea. Ou seja, o FAP busca o apontamento de um cenário que satisfaça as demandas de uma companhia de forma a reduzir ao máximo os gastos operacionais (Medau & Gualda, 2018).

Utilizou-se o FAP como uma forma de selecionar as aeronaves mais apropriadas para uma malha aérea pré-estabelecida, o que não costuma ser a sequência rotineira em companhias aéreas. Normalmente, o recurso em questão é utilizado para a elaboração de uma malha a partir de uma frota de aeronaves já definida. A diferença na ordem das escolhas baseia-se no enfoque estratégico da pesquisa de indicar novos mercados e, consequentemente, impactar diferentes regiões brasileiras que estejam distantes dos grandes centros.

2. METODOLOGIA

A fim de atingir os objetivos esperados, optou-se pelo uso da metodologia de pesquisa do *Design Science Research*, uma abordagem desenvolvida considerando as peculiaridades de um projeto de pesquisa de engenharia com entrega de artefatos (Cauchick-Miguel, 2019)

A partir dos dados disponibilizados pelo Projeto Hórus (HÓRUS, 2022) foi possível entender a necessidade de deslocamento da população brasileira e consequentemente obter uma malha aérea voltada para a aviação regional do país. Por meio deste conjunto de rotas existentes foi possível aplicar o Problema da Alocação de Frota (FAP) para o cenário estudado.

A base da modelagem matemática utilizada para a pesquisa foi desenvolvida por (Jesus, 2019), enquanto a aplicação do modelo ocorreu por meio de um algoritmo escrito em Python modelado inicialmente por (Pereira, 2021) em que foram utilizados os pacotes Numpy, Pandas e o *framework* PulP.

A fim de expandir o trabalho realizado previamente e superar barreiras computacionais encontradas nos estudos

anteriores, optou-se pela inserção de ferramentas operacionais como o aumento no número de restrições ao problema, - inclusão de um intervalo de otimalidade para a solução. Além destas, buscou-se a adequação na formulação do cálculo de CASK, desta vez considerando as diferenças operacionais existentes entre as aeronaves do tipo jato e turboélice, visando a melhoria na performance do algoritmo.

2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Utilizando os recursos da Pesquisa Operacional, tem-se por meta atingir o máximo lucro possível a partir da operação da malha aérea alocada. Assim sendo, optou-se por manter a função objetivo dos trabalhos de (Jesus, 2019) e (Pereira, 2021), representada pela diferença entre receita obtida com a venda de passagens e dos custos operacionais da companhia.

$$[MAX] \equiv \sum_{h\in H}\sum_{j\in J}\sum_{a\in A}\left(T_{h,j}\cdot P_{h,j,a} - C_{h,h,a}\cdot D_{h,j}\cdot S_a\cdot F_{h,j,a}\right) \quad (1)$$

Além da função objetivo foram denominadas também algumas restrições para garantir a proximidade do modelo com o cenário ideal. Sendo elas:

$$\sum_{a\in A} P_{h,j,a} = Q_{h,j} \qquad \forall h\in H, \forall j\in J \quad (2)$$

$$P_{h,j,a} \le S_a\cdot F_{h,j,a} \qquad \forall h\in H, \forall j\in J \quad (3)$$

$$P_{h,j,a} \ge LF(S_a\cdot F_{h,j,a}) \qquad \forall h\in H, \forall j\in J \quad (4)$$

$$R_a \ge D_j\cdot BIN_{h,j,a} \qquad \forall h\in H, \forall j\in J, \forall a\in A \quad (5)$$

$$F_{h,j,a} \le MBIN_a \qquad \forall h\in H, \forall j\in J, \forall a\in A \quad (6)$$

$$F_{h,j,a} \le MBIN2_a \qquad \forall h\in H, \forall j\in J, \forall a\in A \quad (7)$$

$$\sum_a BIN2_a \ge K \qquad \forall h\in H, \forall j\in J, \forall a\in A \quad (8)$$

Em que:

- a = aeronave da amostra A.
- $BIN_{h,j,a}$= Variável binária que possua valor 0 ou 1;
- $BIN2_a$= Variável binária que possua valor 0 ou 1;
- $C_{h,h,a}$ = CASK da aeronave *a* para o destino *j* pelo *hub h*;
- $D_{h,j}$= distância total entre o *hub h* e o destino *j*;
- $F_{h,j,a}$= Fluxo total de aeronaves *a* para o destino *j* pelo *hub h*;
- h = origem em qualquer *hub* dentre os considerados;
- j = conjunto de destinos;
- K = número máximo de aeronaves que podem ser consideradas no modelo;
- M = número máximo de fluxo semanal para uma determinada rota;
- $P_{h,j,a}$= número máximo de passageiros transportados pela aeronave *a* para o destino *j* pelo *hub h*;
- $Q_{h,j}$= demanda de passageiros entre o hub *h* e o destino *j*;
- R_a= alcance de voo máximo da aeronave *a*;
- S_a= número total de assentos na aeronave *a*;
- $T_{h,j}$ = Tarifa de passagem entre o *hub h* e o destino *j*

A equação (2) objetiva garantir que o número de passageiros transportados seja igual a demanda total das rotas, desta forma não há passageiros não alocados. A restrição (3) define que a oferta deve ser maior ou igual a demanda de passageiros. Já a equação (4) objetiva que as aeronaves destinadas

cumpram as demandas de cada rota. E a fim de certificar que a distribuição de aeronaves estará o mais próximo possível de um cenário realista do ponto de vista comercial, optou-se pela implantação de um fator de carga mínimo (LF) de 50% de ocupação para rotas de até 1300 Km de distância (alcance das aeronaves turboélice), entre origem e destino, e de 25% para as demais rotas.

A equação (5) tem a função de garantir que nenhuma aeronave seja alocada em uma rota cuja distância entre origem e destino seja maior que o alcance do veículo. Em (6) é estabelecido o fluxo máximo de cada modelo por rota, enquanto (7) impede que haja fluxo de uma aeronave não alocada. Por fim, a equação (8) tem por objetivo restringir o número máximo de aeronaves alocadas.

É importante registrar também que o número de passageiros e o fluxo sempre serão variáveis inteiras. As restrições bem como a função objetivo foram aplicadas ao conjunto de dados disponibilizados pelo Projeto Hórus (HÓRUS, 2022) e como resultado foi possível obter uma alocação de aeronaves considerada ótima para o cenário avaliado.

2.2 AERONAVES ESCOLHIDAS

Além das adaptações no modelo preexistente, foram escolhidas também as aeronaves utilizadas na simulação. A fim de não tornar o modelo muito específico, optou-se pela generalização dos veículos utilizados. Ou seja, cada um dos modelos selecionados é representativo de uma classe de aviões existentes no mercado de transporte aéreo brasileiro. Os veículos estão registrados na Tabela 1.

Tabela 1 Aeronaves selecionadas.

Aeronave	*Referência*	*Tipo*	*Assentos*	*Alcance*
Turboélice 1	Cessna 208 Caravan	TP	9	1900
Turboélice 2	ATR-42	TP	48	1300
Turboélice 3	ATR-72	TP	75	1600
Jato 1	Embraer E190-E2	TF	105	5000
Jato 2	Embraer E195-E2	TF	130	5000
Jato 3	Boeing 737-700	TF	145	6800

2.3 ALGORITMO DESENVOLVIDO

O algoritmo pré-existente utilizado foi escrito na linguagem de programação Python e foram utilizados os pacotes Numpy, Pandas e o *framework* Pulp. A resolução do problema pode ser dividida em duas etapas, a primeira delas tendo como o objetivo principal o cálculo das distâncias existentes entre as rotas geradas pela malha aérea do Projeto Hórus (HÓRUS, 2022), desenvolvida por (Pereira, 2021). Já a segunda etapa é dedicada aos recursos de pesquisa operacional propriamente ditos.

A rotina de programação principal, que aponta a solução para o cenário começa com a leitura dos dados iniciais como as distâncias calculadas, informações sobre as aeronaves e informações das rotas da malha Hórus. Em seguida, parte-se para o cálculo de CASK das aeronaves para cada uma das rotas

selecionadas e posteriormente todas as demandas são calculadas também.

Observa-se que o CASK é um indicador bastante influente para o modelo. Assim sendo, verificou-se que a modelagem previamente desenvolvida por (Pereira, 2021) utilizava uma mesma formulação para os dois tipos de aeronaves (jatos e turboélices), fazendo com que as vantagens e desvantagens particulares dos modelos fossem mascaradas durante a alocação. Desta forma, optou-se pela separação no cálculo do CASK entre aeronaves do tipo turboélice e jato por meio revisão de fórmulas e da instituição de uma ferramenta condicional no algoritmo.

Por fim, parte-se para a resolução dos problemas de Pesquisa Operacional (PO), seguindo as anotações da seção 2.1 utilizando os recursos do pacote PulP. Entende-se que o modelo desenvolvido se tornou bastante complexo do ponto de vista computacional para a solução completa utilizando todos os tipos de aeronaves consideradas, assim como demonstrado por (Pereira, 2021).

Sendo assim, a resolução da alocação em cenários que utilizam vários modelos simultâneos de aeronaves foi alcançada utilizando a inserção de um intervalo de otimalidade na solução do modelo, por meio do comando GapRel do *framework* PulP. Ou seja, os resultados obtidos são o mais próximo da solução ótima o possível considerando as limitações computacionais existentes. Com esta modificação torna-se possível gerar soluções para cenários que utilizam até 5 modelos disponíveis para alocação de forma simultânea.

Utilizou-se, no desenvolvimento da pesquisa, uma máquina virtual da ferramenta do *Google Colaboratory*. A máquina usada foi disponibilizada de forma gratuita ao usuário, com as seguintes especificações: 12 Gb de memória RAM e 40-59 Mb de cache L3.

3. RESULTADOS

O primeiro ponto a ser observado nos resultados obtidos é que o valor utilizado no *gap* de otimalidade variou de acordo com a quantidade de aeronaves a serem consideradas. Para o caso em que apenas uma aeronave era passível de alocação (K = 1), optou-se por não utilizar o intervalo, devido à baixa complexidade computacional do cenário, logo a solução recebida é ótima. Além disso, optou-se pela eliminação da carga mínima de ocupação da equação (2) neste cenário, devido à dificuldade de encontrar uma aeronave dentre as possíveis que atenda ambos os requisitos de *load factor* e de alcance máximo.

Já para o cenário que considera 3 aeronaves distintas (K = 3), fez-se necessário o uso de um intervalo de 0,005, ou seja, a solução obtida é 0,5% distante da solução ótima relaxada para o modelo matemático. Para os demais valores (K = 2, 4 e 5), foi possível utilizar um intervalo ainda menor, de 0,0005, ou seja, os resultados são apenas 0,05% distantes da solução ótima.

A fim de entender melhor o modelo estudado optou-se por analisar o lucro obtido em cada cenário, o número de passageiros alocados, as aeronaves selecionadas e o número total de rotas a serem voadas. Os resultados podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparativos entre diferentes cenários.

K	*Aeronave alocada*	*Participação na demanda*	*Participação em lucro*
1	Jato 3	100%	100%
2	Jato 1	53,06%	57,94%
2	Turboélice 2	46,94%	42,05%
3	Jato 1	25,12%	29,32%
3	Turboélice 2	1,94%	1,85%
3	Turboélice 3	72,94%	68,83%
4	Jato 1	3,53%	4,00%
4	Jato 3	44,76%	49,54%
4	Turboélice 1	0,27%	0,22%
4	Turboélice 3	51,43%	46,23%
5	Jato 1	3,00%	3,39%
5	Jato 2	3,98%	4,44%
5	Jato 3	41,96%	46,25%
5	Turboélice 1	0,26%	0,21%
5	Turboélice 3	50,89%	45,70%

O primeiro ponto a ser analisado é a alocação de todas as seis aeronaves disponíveis em momentos distintos. Verifica-se na solução encontrada para o cenário com apenas uma aeronave disponível, a alocação do jato 3. Ou seja, diante da necessidade de suprir uma vasta variedade de rotas a escolha do algoritmo foi alocar a aeronave com o maior alcance e maior disponibilidade de assentos,logo, com o menor CASK.

Essa necessidade de atender rotas com altas variações nas demandas e distâncias entrariam em desencontro com a restrição *load factor* presente na equação (2). Isso porque não seria possível a ocupação de 50% da aeronave em rotas de baixa demanda e, ao mesmo tempo, atender todas as distâncias entre origem e destino das rotas existentes.

Analisando os demais cenários, observa-se que a partir do aumento no número de aeronaves disponíveis para alocação, passa-se a ser possível contar com aeronaves que atendem as rotas de forma mais específica. Como por exemplo, o caso do Turboélice 1 (aeronave análoga ao Cessna 208 Caravan) que foi alocado apenas a partir de K = 3.

Observa-se também que no cenário com 5 aeronaves diferentes alocadas, tem-se um cenário bastante parecido com a frota aérea de companhias brasileiras, como o caso da Azul Linhas Aéreas com exceção do veículo Embraer E-190, que não já é mais operado pela companhia. Sendo assim, verifica-se que o cenário mais amplo apresentou resultados satisfatórios, uma vez que todas as restrições do modelo foram atendidas, sendo possível alcançar um resultado realista.

Outro pronto interessante a ser analisado é a variação do lucro de acordo com a mudança na disponibilidade de aeronaves.

Os resultados obtidos encontram-se apontados na Figura 1.

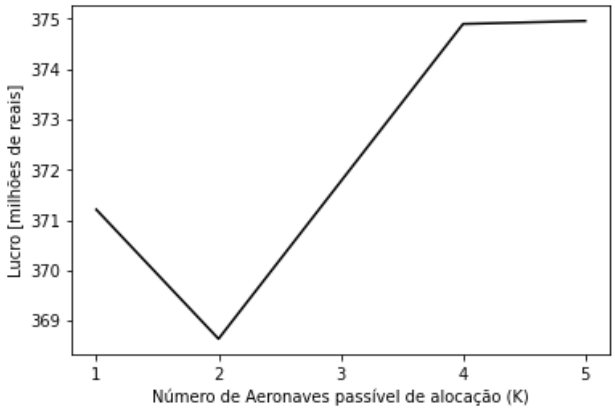


Figura 1 Variação do Lucro entre cenários analisados

O ponto mais importante a ser analisado na Figura 1 é a diminuição no lucro obtido entre os cenários de K = 1 e K =2. Do ponto de vista conceitual, esse resultado pode ser considerado insatisfatório ou irrealista, uma vez que, com o aumento da quantidade de veículos disponíveis, esperava-se que a seleção de aeronaves ocorresse de forma a utilizar os recursos de forma mais otimizada o possível ocasionando em um maior lucro.

Entretanto, é preciso fazer a análise tomando consciência de que há diferenças nas condições nas quais as simulações foram realizadas, devido à implantação do intervalo de otimalidade apenas para o cenário que conta com duas aeronaves alocadas. Além disso, no cenário de K=1 há também a retirada da restrição de ocupação (*load fator*). Ou seja, a primeira solução representa uma simulação ótima, enquanto a segunda representa um resultado 99,50% próximo de ótimo, o que explica a discrepância entre o esperado e o obtido.

4. CONCLUSÃO

Por fim, verifica-se que o objetivo principal do trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível obter uma malha aérea ótima capaz de alocar diferentes aeronaves de simultaneamente. Além disso, observou-se que a expansão da capacidade do modelo matemático e algoritmos pré-existentes, bem como a aproximação do cenário real da indústria a partir das mudanças realizadas no modelo matemático propriamente dito, quando comparamos os resultados atuais e aqueles obtidos anteriormente por (Jesus, 2019) e (Pereira, 2021).

Quanto aos resultados, foi possível observar a importância do intervalo de otimalidade para a redução da complexidade computacional do algoritmo e os impactos dessa alternativa nos cenários obtidos. Essa afirmação pode ser comprovada por meio das simulações de lucro nos cenários considerando K=1 (sem gap) e K=2 (gap = 0,0005). Aponta-se então para a necessidade de inserção de um mínimo intervalo possível, a depender da capacidade computacional da máquina utilizada.

Entretanto, apesar da necessidade de inserção de uma estratégia para contornar as limitações existentes, é possível perceber que os resultados obtidos são considerados satisfatórios. Uma vez que os recursos alocados retornam cenários realistas e condizentes com o que acontece com o setor de transporte aéreo brasileiro. Ou seja, entende-se que o modelo matemático

desenvolvido e demais ferramentas utilizadas são suficientes para cumprir os objetivos iniciais da pesquisa.

Referências

Ajayi, T., Thomas, C., & Schaefer, A. J. (2021). The gap function: Evaluating integer programming models over multiple right-hand sides. *Operations Research.*

ANAC. (2022). Acesso em 28 de Jan de 2022, disponível em https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2022/demanda-e-oferta-no-mercado-domestico-em-2021-tiveram-recuo-ante-periodo-pre-pandemia

Bettini, H. F. (2007). Um Retrato da Aviação Regional no Brasil. *Acervo Científico do Núcleo de Estudos em Competição e Regulação do Transporte Aéreo (NECTAR).*

Cauchick-Miguel, P. (2019). *Metodologia Científica para Engenharia.* Grupo Editorial Nacional.

Fregnani, J. A. (2019). The impac on production and costs per acquisition of an airline by a competor in Brazil: A Cobb-Douglas function aplication. *Revista Transporte*.

Hiller, F. S., & Lieberman, G. J. (2013). *Introdução à Pesquisa Operacional.* Editora Ltda.

HÓRUS. (2022). *Matriz Origem-Destino*. Acesso em 2022 de Fev de 2022, disponível em https://horus.labtrans.ufsc.br/

Jesus, T. D. (2019). Definição da malha aérea e aeronaves para uma nova companhia aérea regional com hub em Goiânica. Brasília, Brasil.

Lederer, R. S. (1998). Airline network design. *Operations Research.*

Medau, J. C., & Gualda, N. D. (2018). Alocação de aeronaves a voos considerando restrições. *Revista Transportes*.

Pereira, G. H. (2021). Estudo de metodologia de otimização para o problema da alocação de frota na aviação regional. Brasília, Brasil.

Robinson, S. (2017). A Tutorial on Simulation Conceptual Modeling. *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference* (pp. 565-579). Las Vegas: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Rodrigues, R. (2013). *Pesquisa Operacional.* Soluções Educacionais Integradas,.

.

METODOLOGIAS PARA RESOLUÇÃO DE CONFLITOS ENTRE AERONAVES BASEADAS EM *GAME TREE*

Lucas B. Monteiro*, Cristiano P. Garcia, Geraldo P. Rocha Filho, Li Weigang
Universidade de Brasília (UnB), Departamento de Ciências da Computação (CIC)

*** Corresponding author e-mail adress:** lucasbmonteiro@gmail.com

PAPER ID: SIT204

RESUMO

Nos últimos anos, houve um progresso significativo no desenvolvimento de modelos relacionados ao gerenciamento de tráfego aéreo (ATM, do inglês *Air Traffic Management*). Considerando vários tipos de eventos envolvidos em um voo (precisão dos sensores, incertezas climáticas e meteorológicas, mudanças nas trajetórias das aeronaves, etc.), muitos esforços ainda precisam ser empregados no desenvolvimento de métodos que possam ser aplicados ao ambiente real com máxima precisão. Todos esses métodos precisam lidar com uma grande quantidade de dados. Nesse contexto, alguns pesquisadores têm buscado diferentes metodologias de inteligência artificial para melhorar a tomada de decisão no transporte aéreo. Esta pesquisa tem como objetivo propor dois métodos diferentes de resolução de conflitos baseados em *game tree*: Busca em Profundidade (DFS, do inglês Depth-First Search) e Alfa-Beta. Serão apresentados os conceitos básicos desses métodos, bem como a modelagem necessária para sua aplicação. Por fim, os resultados das simulações envolvendo diferentes combinações de aeronaves serão analisados, como forma de indicar a possibilidade de aplicação de cada método estudado.

Palavras-chave: Gerenciamento de Tráfego Aéreo, Resolução de Conflitos, Depth-First Search, Aplha-Beta.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, em diversas áreas de aplicação é comum a coleta de uma grande quantidade de dados, que acabam por influenciar sobremaneira a tomada de decisão. Esse novo cenário representa uma mudança de paradigma das decisões baseadas em suposições ou modelos manuais para análises baseadas em modelos matemáticos orientados por dados. O tema *big data* exerce impacto nos mais variados aspectos da sociedade, tais como varejo, indústria, ciências, serviços financeiros e, especialmente, o transporte aéreo (Kieckbusch et al., 2019).

O transporte aéreo global, que desempenha um papel fundamental na promoção do desenvolvimento econômico e social, e que apoia, direta e indiretamente, o emprego de 58,1 milhões de pessoas, contribui com mais de US$ 2,4 trilhões para a economia global e transporta mais de 3,3 bilhões de passageiros e US$ 6,4 trilhões de mercadorias todos os anos, é um importante exemplo do desafio apresentado para a resolução de problemas relacionados à complexidade e incerteza de grandes volumes de dados. Desde 1977, a escala do tráfego aéreo global dobrou a cada 15 anos e provavelmente continuará a dobrar. Esse crescimento da demanda sinaliza a necessidade de mais métodos orientados a dados como forma de melhorar segurança e o desempenho dos voos (Murça et al., 2020).

Portanto, é fundamental o desenvolvimento de novas soluções de tráfego aéreo (Organization, 2013). Nesse sentido, diferentes programas entraram em execução com o objetivo de aprimorar soluções de navegação aérea, como o Single European Sky ATM Research (SESAR) na Europa, o Next Generation Air Transportation System (NextGen) nos EUA e o SIRIUS, no Brasil. Tais programas visam também a promoção da evolução do gerenciamento de tráfego aéreo, convergindo para um ambiente automatizado, integrado e interoperável (Monteiro et al., 2017).

O objetivo principal deste trabalho é apresentar abordagens inspiradas em algoritmos de busca baseados em árvores de jogos - *game tree*, Busca em Profundidade (DFS, do inglês Depth First Search) e Alfa-Beta, com foco na resolução de conflitos entre aeronaves, destacando as principais características e aplicabilidade dos modelos estudados. Dentre as vantagens desta abordagem em comparação ao estado-da-arte, destacam-se: a possibilidade de tratar grandes volumes de estados; a dispensa de reprocessamento (o modelo já leva em conta eventuais conflitos que poderiam ser inseridos em virtude de uma tomada de decisão); e a identificação de soluções globais ao invés de sub-ótimos locais. Espera-se que tais metodologias auxiliem no estabelecimento de um gerenciamento de tráfego aéreo mais eficaz.

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma. A Seção 2. descreve os trabalhos relacionados, discute os desafios e oportunidades enfrentados por esta pesquisa e introduz os conceitos fundamentais das metodologias empregas. A Seção 3. apresenta a solução proposta em detalhes. A seção 4. avalia os resultados obtidos nos estudos de caso definidos para validar a proposta. Por fim, a seção 5. apresenta a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

Existem diferentes estudos focados tanto em *big data*, de maneira genérica, quanto no caso aplicado do transporte aéreo. Dentre as pesquisas avaliadas, Ribeiro (2019) apresentou um framework eficiente para armazenamento e gerenciamento de trajetórias quadridimensionais (4D) usando banco de dados NoSQL, que apresenta desempenho destacado na tarefa de detecção de conflitos. Apesar do avanço no tratamento de *big data* para detecção de conflitos, o trabalho de Ribeiro (2019) não apresentou uma metodologia igualmente eficiente para resolução de conflitos.

Kuchar & Yang (2000) consolidaram 68 estudos dentre as principais abordagens da literatura recente sobre detecção e resolução de conflitos entre aeronaves (CD&R), propondo uma taxonomia que permite classificar as vantagens e desvantagens de cada estudo, focando em 6 aspectos: propagação de estado: nominal (trajetória única), pior caso ou probabilístico;

dimensões do estado: somente horizontal, somente vertical ou ambas (desejável); detecção de conflitos: explícito (desejável) ou não; resolução de conflitos: explícita (desejável) ou não; manobras de resolução: curvas, manobras verticais, mudanças de velocidade ou uma combinação dessas opções (desejável); múltiplos conflitos: pares ou globais (desejáveis).

Yang & Wei (2021) apresentam um modelo para gerenciamento de Aeronaves de Decolagem e Pouso Vertical (eVTOL) sob o pano de fundo da Mobilidade de Área Urbana (UAM). A capacidade de gerenciar essas aeronaves com segurança em uma área urbana lotada é um desafio significativo para o gerenciamento de tráfego aéreo. Para permitir operações sob demanda seguras e eficientes de voo livre autônomo em UAM, Yang & Wei (2021) apresentam uma abordagem como um Processo de Decisão de Markov (MDP) usando um algoritmo de busca baseado na abordagem Monte Carlo. No cenário estudado por Yang & Wei (2021), a aeronave tem um objetivo e decide qual direção tomar em tempo real, enquanto que no transporte aéreo as trajetórias estão sujeitas ao plano de voo previamente definido e modificado devido à restrição final e implementação das trajetórias.

Especificamente no campo de *game tree*, Gianazza & Alliot (2002) apresenta uma proposta de otimização do controle de tráfego aéreo baseada em algoritmos *tree search* e algoritmo genético. Ambas as abordagens forneceram configurações ótimas de setor, em um tempo curto o suficiente para um uso operacional.

Pesquisas envolvendo jogos nos quais humanos competem com uma máquina (computador) são estudas há anos, e ocupam papel central no campo de estudos relacionados à tomada de decisão. Nos primeiros programas, o computador possuia limitações em termos de modelagem e/ou hardware (procesamento e memória), porém os avanços nesse campo e no campo da arquitetura de computadores finalmente permitiram que os computadores começassem a se destacar em jogos complexos, incluindo o xadrez. Muitos algoritmos já foram desenvolvidos para encontrar o melhor próximo passo para o computador, incluindo algoritmos sequenciais como MiniMax, NegaMax, Negascout, SSS*, B* e Alfa-Beta (Elnaggar et al., 2014).

As principais abordagens de programas de jogos usam árvores de jogo para encontrar a próxima melhor jogada, e, em geral, são modelados da seguinte forma (Elnaggar et al., 2014):

- Cada nó representa um estado de jogo.
- A raiz representa o estado atual do jogo.
- Todas as ramificações de um determinado nó representam todos os movimentos possíveis a partir desse nó.
- O nó que não possui nenhum sucessor é chamado de folha.

Uma função de avaliação é usada para determinar quando um nó folha representa uma vitória, derrota, empate ou apenas uma pontuação, caso o algoritmo tenha sido interrompido antes de qualquer jogador vencer, perder ou o jogo terminar com um empate. Os desenvolvedores costumam fazer isso porque, em jogos mais complexos, não existe um algoritmo prático que possa pesquisar em toda a árvore em um tempo razoável, mesmo que use o poder do processamento paralelo. Um exemplo para isso é o jogo de damas e xadrez onde é necessário avaliar cerca de 10^{20} e 10^{40} nós respectivamente (Elnaggar et al., 2014).

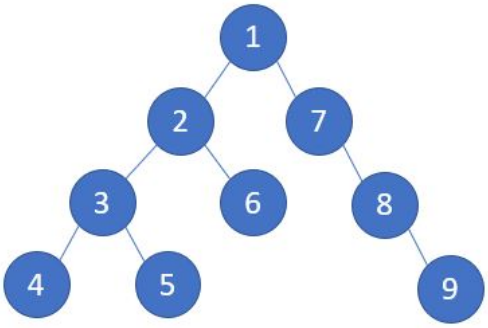


Figure 1 Abordagem baseada no DFS.

A categorização mais comum para algoritmos de busca em árvore de jogos é baseada em profundidade e amplitude. Na pesquisa em profundidade (DFS) o algoritmo começará da raiz e explorará o primeiro nó-filho de cada nível, descendo em uma única linha de nós até atingir o limite de profundidade previamente estabelecido antes de retroceder. Por sua vez, a busca em largura consiste na inspeção de todos os filhos

do nó raiz antes de inspecionar qualquer nó do nível imediatamente abaixo, conforme ilustrado na Figura 1 (Elnaggar et al., 2014).

Os algoritmos de busca em profundidade são categorizados como algoritmos de força bruta, que consiste na observação de todas as variações em uma determinada profundidade. Os principais exemplos de algoritmos de força bruta são MiniMax, NegaMax, Alfa-Beta, NegaScout e Principle-Variation. O algoritmo MiniMax é um algoritmo de árvore de jogo que é dividido logicamente em duas etapas, a primeira para o primeiro jogador que é o computador e a segunda para o segundo jogador que é o humano. O algoritmo tenta encontrar a melhor jogada permitida para o computador, mesmo que o humano faça a melhor jogada para ele. O que significa que maximiza a pontuação do computador quando escolhe o movimento do computador, enquanto minimiza essa pontuação escolhendo o melhor movimento legal para o humano quando escolhe o movimento humano (Russell & Norvig, 2009).

Já o algoritmo Alfa-Beta é uma modificação inteligente que pode ser aplicada ao algoritmo MiniMax (ou NegaMax). Esta variante baseia-se no princípio de que muitos galhos podem ser podados da árvore do jogo, o que reduz o tempo necessário para realizar uma busca na árvore, e dará o mesmo resultado que MiniMax. A ideia principal do algoritmo é cortar os ramos desinteressantes da árvore do jogo. O algoritmo Alfa-Beta usa duas variáveis (alfa e beta) para detectar esses casos, portanto, qualquer valor menor que alfa ou maior que beta será cortado automaticamente sem afetar o resultado da árvore de pesquisa, conforme ilustrado na Figura 2 (Knuth, 2000).

Neste trabalho, serão estudadas duas abordagens de *game tree*: a primeira baseada no algoritmo MiniMax, aqui denominada DFS, e a segunda baseada no Alfa-Beta (Pruning), aqui denominada ABP.

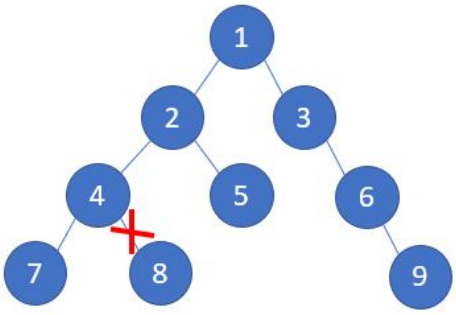


Figure 2 Abordagem baseada no Alfa-Beta.

3. MÉTODO DA PESQUISA E PROPOSTA DE SOLUÇÃO

O presente trabalho faz parte de um estudo mais completo que envolvo desenvolvimento de um framework completo para detecção e resolução de conflitos, sendo a primeira parte, detecção de conflitos, objeto de outra publicação [1]. O foco deste documento está na resolução de conflitos entre aeronaves, e como os algoritmos baseados em *game tree* podem auxiliar nesta tarefa. Inicialmente, é importante estabelecermos as premissas que possibilitaram a modelagem ora apresentada, e que permite a aplicação das abordagens DFS e Alfa-Beta.

Em um processo de detecção de conflitos entre aeronaves é desejável que se identifique não só quais aeronaves estão em conflito como também outras aeronaves que podem ser eventualmente impactadas por qualquer alteração nas trajetórias das aeronaves conflitantes. A quantidade de aeronaves envolvidas ou impactadas por um conflito, bem como a quantidade de alterações nas trajetórias de uma ou múltiplas aeronaves, leva a diferentes estados de combinações que podem solucionar ou não um determinado conflito. A quantidade de estados possíveis E pode ser encontrada por meio da Equação 1, onde a indica a quantidade de aeronaves envolvidas ou impactadas por um conflito e t a quantidade de trajetórias para cada aeronave.

$$E = t^a \tag{1}$$

É possível que uma quantidade mínima de aeronaves necessite de alterar sua trajetória,

[1] https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/6811

ou seja, o t seria diferente de 1 apenas para uma pequena quantidade de aeronaves. Porém, para fins de considerar o cenário mais complexo possível, neste trabalho consideraremos que todas as aeronaves apresentarão t trajetórias possíveis para cada simulação.

Desta forma, no processo de detecção de conflitos, o modelo já considera tanto conflitos entre as trajetórias previstas, ou *default*, quanto trajetórias alternativas para cada aeronave, garantindo que se a escolha por uma determinada trajetória alternativa leva a um novo conflito, este segundo conflito deve fazer parte do problema a ser resolvido. Assim, ao final do processo de detecção de conflitos, todas as aeronaves impactadas, seja pela trajetória *default* ou por quaisquer uma das trajetórias alternativas apresentadas, são colocadas em um cluster de conflitos, possibilitando a identificação de todas as combinações ou estados possíveis.

Após a identificação de todos os estados possíveis, o problema passa a ser, então, encontar uma combinação ou um estado que represente uma resolução de conflitos satisfatória, ou seja, que não exista conflito e que apresente o melhor valor de uma função de avaliação possível. Essa função de avaliação pode representar qualquer critério desejado (consumo de combustível, quantidade de passageiros impactados, performance das aeronaves, etc), e é calculada para cada nó da aeronavae, sendo os valores calculados para os nós folha os valores de função de avaliação que serão usados como critérios de escolha.

Por fim, tanto o algoritmo DFS quanto o algoritmo ABP serão executados para uma mesma combinação de simulação (a aeronaves e t trajetórias), sendo computados o desempenho de cada abordagem na resolução de conflitos.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como forma de avaliar as abordagens para resolução de conflitos, foram criados conjuntos de dados aleatórios com diferentes configurações de aeronaves e trajetórias por aeronaves, o que possibilitou a execução da proposta com combinações de maior e menor grau de complexidade. Foram projetados cenários com 3, 5, 7, 9, 12, 15, 18, 20, 25 e 30 aeronaves e 3 trajetórias por aeronave em todos os cenários. A complexidade desses testes pode ser verificada na Tabela 1, que indica a ordem de grandeza da quantidade de estados possíveis para cada configuração testada (função E), conforme demonstrado pela Equação 1.

Table 1 Casos de teste

Aeronaves	*Trajetórias*	*Estados Possíveis*
3	3	10^1
5	3	10^2
7	3	10^3
9	3	10^4
12	3	10^5
15	3	10^7
18	3	10^8
20	3	10^9
25	3	10^11
30	3	10^14

Considerando que é desejável um tempo de resposta curto, ou seja, que o algoritmo encontre a solução em um curto intervalo de tempo, definiu-se um limiar de 120 segundos, ou seja, foram considerados, apenas, resultados nos quais a solução pode ser encontrada em menos de 2 minutos.

Table 2 Resultados obtidos com os algoritmos DFS e ABP

a	*DFS (ms)*	*ABP (ms)*	*E ABP*
3	0,33	0,27	10^1
5	0,07	0,00	10^1
7	0,63	0,10	10^1
9	7,83	0,13	10^1
12	145,27	0,40	10^2
15	3.858,57	1,40	10^2
18	106.181,87	3,57	10^2
20	-	8,90	10^2
25	-	62,13	10^2
30	-	374,97	10^2

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos tanto com o algoritmo DFS quanto com o algoritmo ABP. Foi definida uma função de avaliação genérica, ou seja, com valores randômicos, e buscou-se pelo estado que apresentasse o maior valor da função de avaliação. As células preenchidas com "−" indicam que a execução do algoritmo demorou

mais do que 120 segundos, ou seja, a execução foi abortada/desconsiderada. A segunda e a terceira coluna apresentam, respectivamente, os tempos de execução dos algoritmos DFS e ABP, respectivamente, e a última coluna apresenta o espaço de busca verificado pelo algoritmo ABP, permitindo avaliar em qual medida o mecanismo de *pruning* do Alfa-Beta possibilitou reduzir esse espaço de busca.

No cenário mais complexo, que é composto por 30 aeronaves, o algoritmo ABP possibilitou uma redução na busca bastante significativa, da ordem de 10^{28}. Como o algoritmo DFS percorre toda a árvore, seu espaço de busca torna-se significativamente maior. A comparação da última coluna da Tabela 1 com a última coluna da Tabela 2 indica que a abordagem ABP reduz consideravelmente o esforço do algoritmo, justificando, assim, o resultado consideravelmente melhor.

A Figura 3 apresenta o gráfico comparando as duas abordagens, ilustrando os números apresentados na Tabela 2. A reta da função Limiar divide o gráfico na posição 120.000 milisegundos, separando os resultados que são viáveis (abaixo da reta) dos que são inviáveis (acima da reta), estes últimos por levarem mais de 2 minutos para identificação do resultado. Como pode ser observado, o algoritmo baseado na abordagem DFS consegue solucionar em tempo satisfatório configurações de conflitos mais simples, com menos aeronaves. Graficamente, esse comportamento é representado pela manutenção da função referente ao DFS manter-se abaixo do Limiar até a posição 18 (aeronaves) no eixo horizontal. Na aplicação em que o limite de execução ficou próximo do limite aceitável, isto é, com mais aeronaves (justamente a posição 18 do eixo horizontal), o algoritmo DFS encontrou a solução em 1 minuto e 46 segundos, em um contexto com 10^8 estados possíveis, situação que apesar de mais simplificada, pode ser aplicada em setores específicos do espaço aéreo.

Por sua vez, a abordagem ABP conseguiu encontrar a solução para todos os testes realizados, inclusive os mais complexos (da ordem de 10^{44} combinações possíveis), com um pico de tempo de execução ainda menor do que o observado com a abordagem DFS, isto é, aproximadamente 47 segundos. Esse comportamento é ilustrado pela manutenção da função referente à abordagem ABP sempre abaixo do Limiar, mais precisamente sempre muito próximo do eixo horizontal, sugerindo que para todos os casos a solução foi encontrada em tempo sensivelmente inferior aos 2 minutos estabelecido.

Por fim, é importante ressaltar que, como o foco do trabalho consistiu na resolução de conflitos entre aeronaves agrupadas em clusters de conflitos, não foram identificados datasets equivalentes que pudessem ser utilizados como forma de comparar os resultados. Diante dessa dificuldade, optou-se por utilizar dados randomizados gerados a partir de um algoritmo próprio, que possibilitou, também, garantir que a abordagem proposta pudesse ser aplicada tanto em cenários simples quanto em cenários demasiadamente complexos, que, inclusive, não devem ser observados no contexto real, garantindo a eficácia da proposta.

5. CONCLUSÃO

Investigar metodologias e modelos para manipulação de grandes volumes de dados (*big data*), principalmente quando aplicadas às diferentes áreas da sociedade, é fundamental para o incremento da qualidade na tomada de decisão, e no caso do transporte aéreo não poderia ser diferente. Este trabalho teve como objetivo exercitar o tratamento de *big data* aplicado ao contexto de análise prévia de rotas para buscar e solucionar possíveis conflitos de tráfego aéreo, investigando métodos que pudessem auxiliar a tomada de decisão por órgãos de gerenciamento de fluxo e de controle de tráfego aéreo considerando situações de grande complexidade.

Foram apresentadas e estudadas duas abordagens inspiradas em algoritmos clássicos baseados em *game tree*, Busca em Profundidade (DFS) e Alfa-Beta (ABP), com foco na etapa de resolução de conflitos entre aeronaves, tendo sido possível observar que, com uma modelagem adequada, tais algoritmos podem

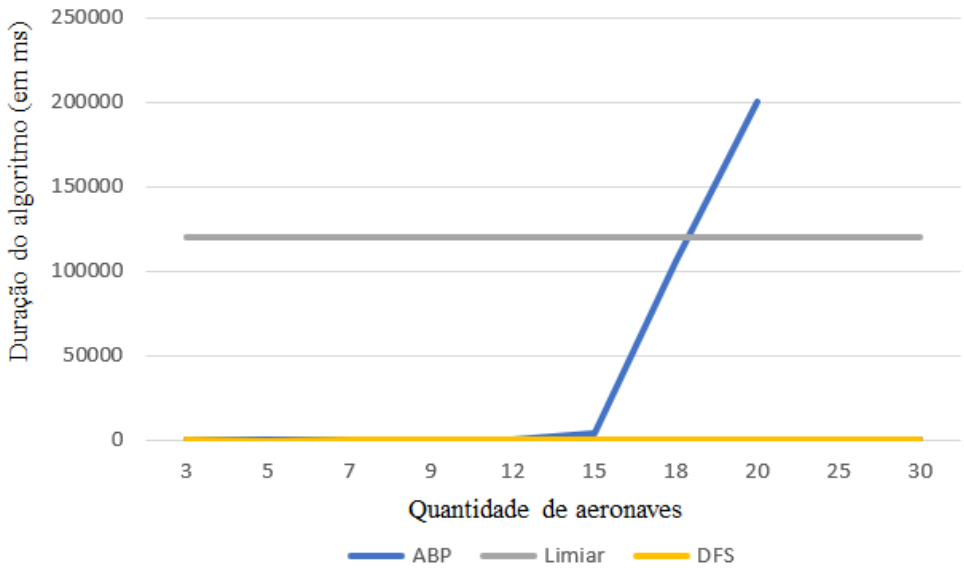


Figure 3 Comparação das abordagens DFS e ABP com o Limiar.

auxiliar na identificação da solução mais adequada, ou seja, na seleção da combinação de trajetórias que garante a segurança do voo, em especial a abordagem inspirada no Alfa-Beta. Adicionalmente, a metodologia apresentada possibilida lidar com um importante problema das abordagens de detecção e resolução de conflitos, que é provocar novos conflitos ao se tentar solucionar um conflito inicial. A ideia de se trabalhar com clusters de conflitos possibilita, em um único passo, antecipar e resolver eventuais consequências de uma mudança de trajetória necessária para se resolver um conflito explícito.

Como sugestão para trabalhos futuros, é importante amadurecer a modelagem, principalmente nas fases anteriores do voo e no estágio de deteção de conflitos, de modo a possibilitar a identificação das medidas adequadas para resolução de conflitos com disponibilidade de tempo suficiente para que as soluções propostas possam ser executadas. Adicionalmente, pode ser interessante aplicar novas abordagens baseadas em algoritmos de busca, de forma a avaliar os comportamentos comparativamente aos dois modelos aplicados neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é parcialmente apoiado por: CNPq, processo: 309545/2021-8; e FAPESP, processo: 2021/06210-3.

References

Elnaggar, A., Gadallah, M., Mostafa, M. & Eldeeb, H. (2014). A comparative study of game tree searching methods, International Journal of Advanced Computer Science and Applications 5, 68–77.

Gianazza, D. & Alliot, J.-M. (2002). Optimization of air traffic control sector configurations using tree search methods and genetic algorithms Anais do DASC 2002, Digital Avionics Systems Conference, Vol. 1 Irvine, United States pp. pp 2A5–1 – 2A5–8.

Kieckbusch, D. S., Rocha Filho, G. P., Ribeiro, V. F., Fregnani, J. A., Mattos, B. S. & Weigang, L. (2019). Negotiation approach by reinforcement learning for takeoff sequencing decision in airports Anais do 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), IEEE pp. 4477–4482.

Knuth, D. (2000). Selected Papers on Analysis of Algorithms, Center for the Study of Language and Information, USA.

Kuchar, J. & Yang, L. (2000). A review of conflict detection and resolution modeling methods, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 1(4), 179–189.

Monteiro, L. B., Barbosa, I. S. R., Weigang, L., Fregnani, J. A., de Oliveira, I. R. & Balvedi, G. (2017). Uma proposta de arquitetura swim para o cenário brasileiro Anais do XVI Sitraer, UFRJ.

Murça, M. C. R., Guterres, M. X., de Oliveira, M., Tarelho Szenczuk, J. B. & Souza, W. S. S. (2020). Characterizing the brazilian airspace structure and air traffic performance via trajectory data analytics, Journal of Air Transport Management 85, 101798.

Organization, I. C. A. (2013). Doc 9750-an963. 2013-2028 global air navigation plan. fourth edition., ICAO.

Ribeiro, V. F. (2019). A Novel Approach for Conflict Detection and Resolution for Trajectory-Based Operations in 4D-Navigation using NoSQL Databases and Local Search Algorithms PhD thesis, Universidade de Brasília.

Russell, S. & Norvig, P. (2009). Artificial Intelligence: A Modern Approach, Prentice Hall Press, USA.

Yang, X. & Wei, P. (2021). Autonomous free flight operations in urban air mobility with computational guidance and collision avoidance, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 22(9), 5962–5975.

LIFE CYCLE COST OPTIMIZATION FOR E-VTOL CHARGING AND SUPPORT INFRASTRUCTURE PLANNING IN ON-DEMAND URBAN AIR MOBILITY

Caio Gonçalves Natalino*, Henrique Costa Marques, João Pedro Pinheiro Malère
Aeronautics Institute of Technology – ITA

*** Corresponding author's e-mail address**: caionatalino@ita.br

PAPER ID: SIT194

ABSTRACT

Seeking to minimize traffic congestion in cities, the aeronautical industry has recently intensified the exploration of Urban Air Mobility (UAM), focusing its efforts on developing electric Vertical Take-Off and Landing (e-VTOL) configurations and their supporting systems. The urban on-demand e-VTOL scenario requires a large dispersion of support infrastructure points and high operational dynamism. The current energy density of e-VTOL electric batteries makes their range limited, and electrical energy supply must be performed through charging or swapping stations during operation. There is a gap concerning modeling for urban e-VTOL to allow the operator, from the perspective of life cycle cost and fleet availability, to plan a cost-efficient allocation of its fleet support and energy supply infrastructure. This work addresses the development of a Life Cycle Cost (LCC) optimization model based on UAM e-VTOL support and energy supply infrastructure planning and allocation. The model was divided into two main steps: the energy supply infrastructure allocation; and the support, logistics, and spare parts supply network allocation. For the former, a Genetic Algorithm was applied to find optimal locations for energy supply infrastructure, minimizing LCC. We conduct the optimization of the spare parts for the latter in Systecon OPUS10. We implemented an e-VTOL as an air taxi operation in the city of São Paulo case study to verify the effectiveness of the model. As a result of the work, it was obtained the case study's LCC and the location and number of energy stations within the e-VTOL support infrastructure network for both battery-swapping and plug-in charging systems. The methodology and algorithms used proved efficient for planning the support and energy supply infrastructure for urban on-demand e-VTOL, given systems specifications and the operational profile. In addition, it was possible to compare both energy supply concepts in terms of LCC.

Keywords: e-VTOL, Urban Air Mobility, Supportability, Facility Location Problem, Charging Station Allocation Optimization.

1. INTRODUCTION

Worldwide, populations are growing every year, and consequently, more people need to move to urban areas, which have limited transport infrastructure. In São Paulo, according to recent estimates by Grandl *et al.* (2018), an inhabitant spends an average of 86 hours a year in traffic jams.

Urban Air Mobility (UAM) is presented as a solution for urban transport, given its faster trip characteristics and less need for operational infrastructures such as roads or rails. It comprises a low-altitude aerial operation with take-off and landing points built near or on top of buildings (Vieira *et al.*, 2019).

From the publication of Holden & Goel (2016) white paper, where Uber presented its vision for UAM in the coming years, electric vertical take-off and landing (e-VTOL) vehicles were indicated to perform urban air taxi on-demand service, with faster trips, less noise, and less environmental impact.

Their implementation as urban air taxis is subject to high dynamism and demand variations during the day or depending on geographic location and requires a large dispersion of infrastructure points. Hence, it presents high complexity in the planning, operation, and control.

The current maturity and energy density of electric vehicle batteries make their range limited. Therefore, the concentration or dispersion of energy supply and support bases directly affects their availability and operation. This restriction is one of the biggest challenges in providing adequate locations to support the operation of e-VTOL. In addition to design functionalities, considerations about the operation and disposal phases and their related costs must be performed.

The provision of operational and maintenance facilities should minimize acquisition costs and simultaneously fulfill customer demand. Current heuristics and models that plan support infrastructure do not consider the energy supply installations allocation optimization and the Life Cycle Cost (LCC) related to the acquisition, provisioning, and operation of these facilities.

Hence, the present work aims to perform the optimal allocation of e-VTOL energy supply and support infrastructure for Urban Air Mobility from the perspective of LCC and fleet availability. This process is divided into two main steps: the allocation of fast charging or battery swapping stations and the support network and spare parts optimization. The article also contributes to filling a research gap by addressing the supportability of UAM e-VTOL.

2. LITERATURE REVIEW

The current literature has some works with a similar focus as this research but in different applications, such as electric cars and buses. As it is a recent topic, studies on the planning of e-VTOL infrastructure are still scarce, and they do not aim to analyze the investments in infrastructure provisioning.

Dong *et al.* (2014) solved the electric vehicle charging location optimization problem to determine a set of locations where public chargers should be installed, as well as the type of chargers to be installed at each location. The solution algorithm chosen was the Genetic Algorithm (GA), and the problem aims to minimize the missed missions due to uncharged batteries, given a budget constraint for the construction of support infrastructures.

In their work, Zheng *et al.* (2014) developed a framework for the optimal design of battery charging or swapping stations for electric cars based on LCC. Their method made it possible to compare the two types of electric vehicle energy replenishment systems, but their contribution focuses on the energy distribution network.

The work of Kunith *et al.* (2017) involves modeling and optimizing the fast-charging point allocation problem for a Berlin bus network, considering three different types of buses for consumption.

Fadhil (2018) conducts a ground infrastructure allocation for urban e-VTOL based on an analysis using a geographic information system. The study, therefore, leans towards operational research, disregarding aspects of supportability or energy supply considerations.

Wu & Zhang (2019) optimize a dual model: e-VTOL charging scheduling and passenger scheduling integrated. Their

optimization problem seeks to minimize the total waiting time for passengers as a function of various charging times and passenger queue constraints.

In their paper, Jordán *et al.* (2021) propose optimizing the electric car charging infrastructure configuration in the city of Valencia through an agent-oriented approach employing a GA. The objective of its optimization involves the minimization of cost and the fulfillment of a specific level of service.

From a heuristic that combined Quantum Annealing (QA) and GA, Chandra *et al.* (2021) solved the electric vehicle charger placement problem by minimizing travel distance from points of interest to the battery charging infrastructure. They focused only on the optimal geographic positioning of the chargers given a set of points of interest.

2.1. Energy Supply Allocation Optimization Problem

The charging station placement problem or battery swapping station allocation problem seeks to find the ideal location of energy supply stations in the transport network so that the operational parameters of the distribution network and the demand fulfillment are less affected. Its main objective is to minimize a specific function, which can comprise costs, distance, voltage deviation, and net benefit (DEB *et al.*, 2018). Exact optimization algorithms, linear integer programming or mixed-integer programming, and evolutionary algorithms can be adopted for the problem solution.

Since the objective functions of energy supply allocation optimization problems are multivariable and complex, works in this area commonly use evolutionary optimization algorithms to achieve robust solutions (DEB *et al.*, 2018). They follow the principle of survival of the fittest individual from randomly generated population sets.

According to Deb *et al.* (2018), computational and conceptual simplicity, a wide range of applications such as complex engineering problems, the possibility of hybridization with classical algorithms, and, finally, more agile convergence criteria are the main advantages of evolutionary algorithms, and the reason of them have wide application in energy supply allocation problem. Hybrid optimization algorithms that combine classical techniques with evolutionary algorithms can also be adopted to solve this problem (JORDÁN *et al.*, 2021; CHANDRA *et al.*, 2021).

Genetic Algorithm is one of the known techniques to solve complex optimization problems. They consist of elements such as population, generations of individuals, crossover, mutation, selection procedures, coding of an individual's genome, objective function, and stopping criteria (JORDÁN *et al.*, 2021). We describe a flowchart of the process performed by the GA in Figure 1.

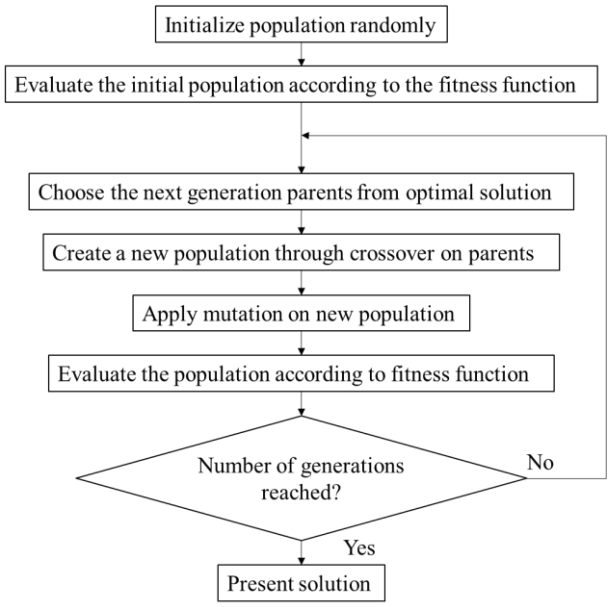


Figure 1 - Genetic Algorithm Flowchart

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Computational Tools Overview

OPUS10 is a spare parts optimization and logistic support analysis tool. The models simulated in OPUS10 aim to reduce inventories and invested capital, detail the support organization, and observe its impact on system performance (SYSTECON, 2019). We employed the software version 2019 64-bit in this work.

Pymoo is a complete Python framework for multi-objective optimization

with customizable implementation (BLANK; DEB, 2020). In this work, we used Python V3.7.6 and Pymoo V0.6.0, free on official websites.

3.2. Energy Supply Allocation Optimization

This model has as its main objective to indicate at which points of the ground infrastructure network, or Points of Interest (PoI), it is necessary to install or build the equipment for charging or swapping electric batteries. The set presented must respect operational restrictions and meet the expected demand.

According to German *et al.* (2018), the cost of building a vertiport is expected to be significant. The number of available locations is limited, which encourages building as few vertiports as possible. For electric cars, the optimization problem of electric vehicle charger placement has become of great interest since the costs associated with providing electric chargers for these vehicles have increased with the uptake. However, as the number of charging stations for allocation increases, the problem becomes less manageable due to its characteristic of a hard non-deterministic polynomial time (NP) problem (CHANDRA *et al.*, 2021).

The problem definition of this work is based on the activity-based approach for electric car charging infrastructure planning presented by Dong *et al.* (2014), and is given by:

$$\min \sum_n (y_n * C_{station}), n = 1, \dots N \quad (1)$$

$$y_n = \begin{cases} 0 \rightarrow If\ there\ is\ not\ energy\ supply \\ 1 \rightarrow If\ there\ is\ energy\ supply \end{cases} \quad (2)$$

Subject to:

$$y_n \epsilon \{0; 1\} \quad (3)$$

$$\sum_{n \epsilon N} y_n \geq 1, \forall n \epsilon N \quad (4)$$

$$SOC \geq 0.3 * Re \quad (5)$$

$$SOC \leq 0.8 * Re \quad (6)$$

The formulation above defines a single-objective optimization problem with N decision variables. The objective function in (1) aims to minimize the total cost of building the energy supply network. The constant $C_{station}$ refers to the construction and installation costs of the energy supply equipment and assumes different values for the plug-in charging system and the battery-swapping system. N is the number of PoI of the evaluated support network and delimits the set of decision variables (y_n) of the problem. As shown in (2), they assume a value of 0 if they do not have energy supply infrastructure and 1 if they do.

The problem has four constraints: constraint (3) defines the decision variables as a binary, and constraint (4) enforces there to be at least one point of energy supply in the support network. The constraints (5) and (6), respectively, correspond to the lower and upper limits of the State of Charge (SoC) measured in the distance.

The lower absolute limit refers to a safety limit for the aircraft to perform emergency flights to the nearest landing point. The upper limit aims to guarantee a longer battery lifespan. The 30% and 80% of range values were determined based on the electric bus discharge presented in Kunith *et al.* (2017) electric bus charging stations optimization.

Once the charging location problem objective function is generally a mixed-integer nonlinear and nonconvex programming problem, its solution through conventional mathematical programming methods is difficult (ZHENG *et al.*, 2014).

Thus, recent research works have sought to implement heuristics to solve this problem, presenting satisfactory performance. Evolutionary algorithms have advantages commonly implemented in this type of solution, among them, more specifically, the Genetic Algorithm. In the present work, we implement the package *pymoo algorithms soo nonconvex ga*, a basic genetic algorithm for single-objective problems offered by Pymoo in Python.

To define the population size and number of generations of the algorithm, we tested the convergence of results and computational consumption, measured by the time taken to execute the application and the results. Then, we set the population size to 1000 and the number of generations to 500

with random and binary population sampling. Each gene of the individual in the simulation represents a PoI, that is, a site of the support infrastructure, and its content represents the binary decision variables of the problem. Figure 2 illustrates an example of an individual chromosome implemented in the algorithm.

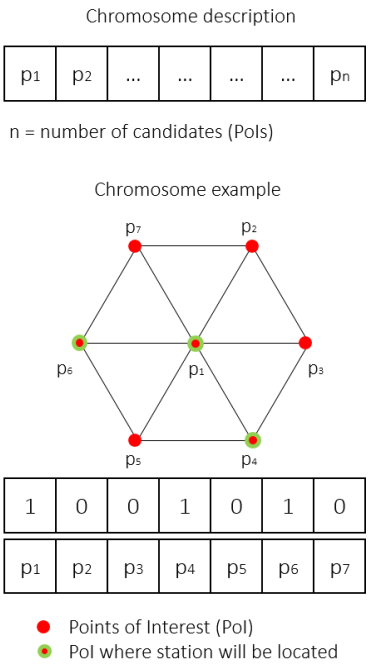


Figure 2 - Individual Chromosome

The module used to define the selection of parents for reproduction during the simulation was the Tournament Selection. In the crossover, we adopted the Binary Half Uniform Crossover method. Finally, for the mutation of some individuals in the population after the creation of descendants through the crossing, we resort to Bit Flip Mutation (PYMOO, 2022).

The problem execution counts as input the operational horizon, the fleet size and its location at the beginning of the operation day, the distances between the support sites, the list of daily routes executed by each e-VTOL, the turnaround time (TAT) in minutes, the available electric power in battery charging stations and the e-VTOL range and power consumption rate specifications. The simulation follows: for each e-VTOL in the fleet and each route performed, it calculates the possible energy replenishment (R), measured in the distance, at the route's destination site.

In the case of vehicles with the battery-swapping system, this is equivalent to the complete refueling of the vehicle, that is, the aircraft returns to its design range R_e from the State of Charge on departure from the previous site SoC_{pre}, as presented in equation (7).

$$R_{swapping} = y_n * (R_e - SoC_{pre}) \quad (7)$$

Equation (8) concerns the possible energy replenishment of vehicles with the plug-in charging system, calculated by the increase in range (P/r) that occurs when the vehicle is parked on the site, that is, its TAT. If the TAT is more than enough to charge the battery, charging stops when it reaches its design range. For both systems, the possible energy replenishment will only occur if the decision variable corresponding to the destination site of the route is equal to 1.

$$R_{plug-in} = y_n * \frac{P * TAT}{r} \quad (8)$$

Then, it calculates the State of Charge (SOC) of the e-VTOL in the next e-VTOL departure. It is equal to the sum of the State of Charge in the departure of the previous site (SoC_{pre}), and the energy charging in the site in question (if any), subtracted from the last flight leg traveled, which represents the battery charge loss measured in the distance, as described in equation (9). The simulation respects the constraints of the problem. It returns the objective function, that is, the cost of building the optimal energy supply network, given the demand and the set of sites with energy supply stations.

$$SOC = SoC_{pre} + R - distance \quad (9)$$

3.3. Support Network Optimization

In this work, support network optimization takes place in two steps. The first one is the optimization of inventories and spare parts in the network, based on the OPUS10 software calculator.

The second consists of the support organization definition based on the exhaustive simulation of 47 possible scenarios for this support network. The scenarios consist of possible support organizations in the set of PoIs of the case study, considering stocks and depot levels internal or external to the network.

This simulation is followed by comparing their effectiveness and choosing the one that presented the lowest costs for the highest availability values.

OPUS10 performs an optimal allocation of spare parts in the support organization. It generates a cost *versus* effectiveness (CxE) curve, which in this research is translated into spare/repair parts cost and availability, respectively.

For each of those scenarios, we run an optimization of inventories and spare parts via OPUS and generate the CxE curve. We then compare these curves in terms of spare/repair parts cost and availability and define which one is the most appropriate organization for the case study. After defining the optimal support structure, we calculate de system LCC.

3.4. Life Cycle Cost Calculation

To calculate the LCC of the problem proposed in this research, we are based partly on the Cost Breakdown Structure presented by Blanchard & Blyler (2016), which covers development, investment and maintenance, and operation costs, in addition to those related to system retirement. In our calculation, we consider the construction of maintenance facilities cost (CICM), initial spare/repair parts cost (CILS), test and support equipment acquisition cost (CILX), maintenance spare/repair costs (COMX), and system phase-out and disposal cost (COP).

The total LCC of the system is given by the sum of all the cost portions, as described in equation (10).

$$LCC = CICM + CILS + COMX + CILX + COP \quad (10)$$

CICM and CILX values come from energy supply allocation, while CILS and COMX come from support network optimization and inventory dimensioning. The COP refers to battery disposal and is calculated by the number of batteries defined for the two types of aircraft based on their average utilization rate.

3.5. Case Study

The implementation of a case study of the e-VTOL operation as an air taxi in the city of São Paulo that aims to verify the model's effectiveness is presented in this subsection.

In the initial phase of data collection for the case studies, the literature defines Points of Interest (PoIs), candidate locations to host the energy supply infrastructure. From the PoIs, the GA will define which subset is the most appropriate for the allocation of refueling stations, considering the definition of the objective function and the problem's constraints.

Kohlman & Patterson (2018) used a simplified generic UAM network model, composed of seven distributed vertiports in which six of them form a hexagonal pattern and the seventh is located in the center of the hexagon.

Figure 3 illustrates the model used, based on Kohlman & Patterson (2018). To calculate the distances between the PoIs, we measured the straight line between the points of the model, when projected on the map of São Paulo. They are described in Table 1.

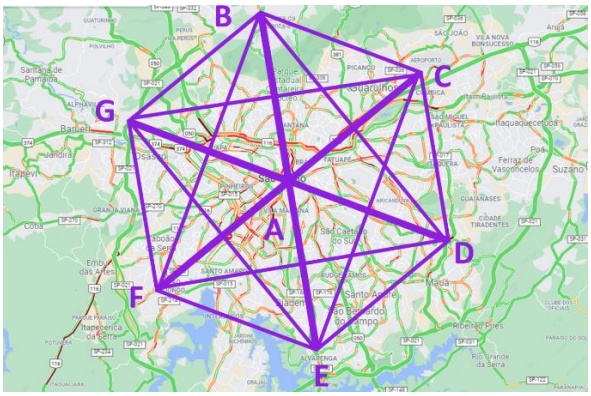


Figure 3 - E-VTOL graph for ground infrastructure distribution analysis in São Paulo, Brazil.

We used a list of routes to be performed by each e-VTOL daily generated from a simulation developed in previous author's work. It considers two types of demands in the ground infrastructure network: a higher one, present in PoIs A, B and C, and a more relaxed one, present in PoIs D, E, F and G. The demand is composed of one or more Poisson Distributions that represent the arrival of passengers every half hour in the 12 hours of the operational horizon.

Table 1 - Distances of UAM ground infrastructure distribution pairs.

VERTIPORT PAIR	DISTANCE (Km)
AB, AC, AD, AE, AF, AG	20
BC, CD, DE, EF, FG, GB	20
BE, CF, DG	40
BD, BF, CG, CE, DF, EG	34.6

In 2018, Porsche Consulting developed a market study on the implementation of e-VTOL as air taxis in major cities around the world and projected the number of vehicles that would come into operation, as well as the number of passengers and market value involved (Grandl *et al.*, 2018).

For the city of São Paulo, in the initialization phase, it was estimated that a network of five vertiports would serve 120 e-VTOL.

Since the ground infrastructure network of the case study has seven vertiport candidates, we performed a linear interpolation with the data presented and obtained a demanded fleet of 132 aircraft. These 132 vehicles were distributed across the sites, 19 being allocated to PoIs A, B, C, D, E, and F, and 18 to PoI G.

Figure 4 presents the specifications of the e-VTOL used in the case study. As the focus is the comparison and impacts analysis of the difference in energy restoration systems, we only consider differences in the electric batteries used.

Battery Swapping e-VTOL			
Item / LRU	**Unit Price [$]**	**Failure Rate [1/MOPH]**	**Quantity**
AVNX module	30000	0,0035	1
Electric generator	15000	11,1	2
Electric battery	60000	45,66	2*(2+Op)
LDG shimmy damper	1200	6,49	2
Fire supression system	6000	0,0618	1
CMC	3000	15,3	1
Engine	80000	5,53	8
External light	1000	10	4
Recirculation fan w/ check valve	2000	5,19	2
Plug-in Charging e-VTOL			
Item / LRU	**Unit Price [$]**	**Failure Rate [1/MOPH]**	**Quantity**
AVNX module	30000	0,0035	1
Electric generator	15000	11,1	2
Electric battery	17500	45,66	8
LDG shimmy damper	1200	6,49	2
Fire supression system	6000	0,0618	1
CMC	3000	15,3	1
Engine	80000	5,53	8
External light	1000	10	4
Recirculation fan w/ check valve	2000	5,19	2

Figure 4 - e-VTOL systems specifications

The plug-in charging system has eight internal batteries, each with a list price of $17,500, having a failure rate of $5.66 * 10^{-6}$, which is equivalent to a Mean Time Between Failure of approximately 21,000 FH. As for the battery-swapping system, we consider that there are two battery packs with the same performance and reliability as the other system but with a list price of $60,000 each.

In the case of the battery-swapping system, for the calculation and optimization of inventories, there is the particularity that there must be storage of batteries for operation, not just for replacement. Thus, we multiply the number of base packs by a multiplicative factor for the purchase of these packs that are charged on the ground and await the landing of the aircraft to be installed in the vehicle after the removal of the one that is partially unloaded. This multiplicative factor considers Mean Time Between Swapping (MTBS), resulting from the average use of vehicles in operation.

The range considered for the aircraft was 180 km, and the turnaround time for boarding and departure of passengers was 10 minutes. The electrical power (P) available for fast charging was 100 kW. The consumption rate of the e-VTOL (r), used for converting the SoC of the batteries in the remaining range, was 0.3 kWh/km.

Table 2 presents the estimation of the LCC portions for both types of systems. The construction of maintenance facilities involves costs related to provisioning energy for electrical charging and sheltering equipment when necessary. The costs of plug-in systems, therefore, are considered more expensive, as this type of fast charging involves high power levels, which are more expensive to provide.

Table 2 - Energy Replenishment Infrastructure Involved Costs.

	Plug-In	Battery Swapping
CICM	1.000.000,00	800.000,00
CILX	20.000,00	500.000,00
COP	5.000/battery	10.000/battery

Finally, for the implementation of the case study, we adopted some assumptions. They were responsible for the simplification of the testing of the model, but they can be relaxed in other works after identifying which impacts the proposed methodology, if any. The assumptions are listed below.

- All e-VTOL fleet start their operation fully charged;
- At every stop at a site with electrification, there is energy restoration activity for both types of systems;
- The demand is fixed for every day and every season of the year in the present case study.

4. RESULTS

As a final product of the optimization model implementation, we indicate the optimal infrastructure to support and supply energy for UAM e-VTOL plug-in charging and battery-swapping energy replenishment systems. In addition, we compared these two e-VTOL configurations regarding the LCC of each of them.

From the number of landings in each PoI available in the input performed routes list, we can calculate the average utilization of the ground infrastructure. The calculation follows equation (11), which represents the total number of landings in the complete simulation ($landings_n$) divided by the number of simulated operating days (d_{op}) and by the operational horizon, that is, the number of hours of operation of the systems daily (h_{op}). N equals the number of PoIs.

The results are shown in Table 3. When there is an energy replenishment infrastructure in PoI, for battery-swapping system vehicles, this average utilization denotes the total number of times we had batteries swapped in PoI. Hence, when we sum the total average utilization and divide by the fleet $n_{fleet,}$ we obtain the battery-swapping rate for energy replenishment for each e-VTOL, which in this work we call 1/MTBS, as described in equation (12). MTBS is the Mean Time Between Swapping.

$$MeanUtilization_n = \frac{landings_n}{d_{op} * h_{op}}, n \epsilon N \qquad (11)$$

$$\frac{1}{MTBS} = \frac{\sum_n MeanUtilization_n}{n\_fleet}, n \epsilon N \qquad (12)$$

Table 3 - Average use of the energy replenishment infrastructure in case the PoI has a charging or swapping station.

PoI	Mean Hourly Utilization (h)
A	32,76
B	28,69
C	26,32
D	22,69
E	21,64
F	21,67
G	21,1

Thus, the battery-swapping rate for energy replenishment for each e-VTOL (1/MTBS) equals 1.32. With this value, we can estimate that, for each e-VTOL in the fleet, one operational replacement batteries will be needed, that is, those that must be charged on the ground and ready to be installed in the vehicle during the TAT. This value is the multiplier cited in the system specification presented earlier in this report.

Once six TATs can fit within an hour of operation, we can divide the average hourly utilization of the PoIs to determine how many chargers or swappers will be in each of them. 6 GSEs are required on PoI A, 5 on PoIs B and C, and 4 on PoIs D, E, F and G.

After the 30 days of operation routing performed, for each of them the Genetic Algorithm solves the problem of allocation of energy supply stations and informs in which PoIs there is a need to have a plug-in charger or a battery swapping station. The graphs presented in Figure 5 express the number of times that the PoIs were pointed out by the GA as a host of energy supply infrastructure, for both systems.

We consider those PoIs that recorded the need for refueling infrastructure in at least 80% of the simulations to be the chosen PoIs of our e-VTOL UAM ground infrastructure. This ensures that possible variabilities in the solution algorithm or random behavior in routing does not affect, in isolation, the provision of support and electrification infrastructure.

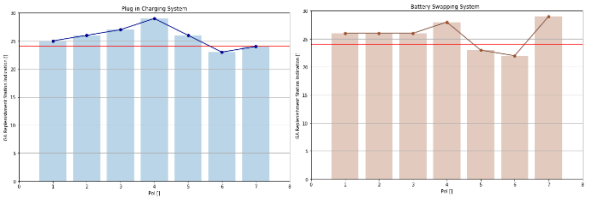


Figure 5 - Need for hosting charging stations or battery swapping by Point of Interest.

The objective function found in this scenario provides the LCC portions of CICM and CILX.

The Cost *versus* Effectiveness (CxE) curves obtained for each of the support organization scenarios simulated in OPUS10 for the plug-in replenishment system were compared. The best curves for both systems are shown in Figure 6 and Figure 7. In the figures, the numbers associated with the curves correspond to the 47 scenarios commented on previously.

As an evaluation criterion, we consider that the chosen support network should ensure availability of at least 95%. Scenario 35 presented the best CxE set in both energy replenishment systems, with the availability of 95,02% and 95,44%, and 132,900 and 271,400 spare or repair parts cost for plug-in charging and battery swapping, respectively. Those will be the CILS and COMX portion of the LCC.

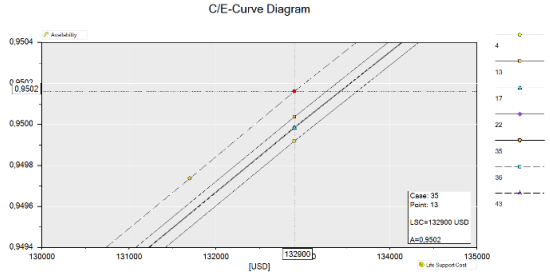


Figure 6 - Best support organization scenarios in terms of CxE for e-VTOL with the plug-in charging system.

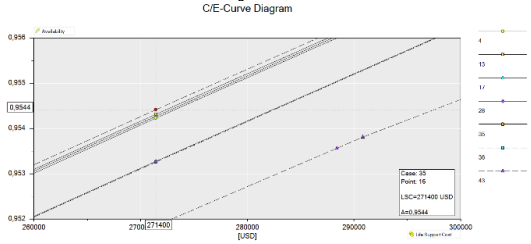


Figure 7 - Best support organization scenarios in terms of CxE for e-VTOL with the battery-swapping system.

Therefore, the optimal support network chosen for the case study is the one with a central depot located in PoI A and the other PoIs only as operational sites. This result is as expected since, in the graph used, site A is closer and equidistant from all other sites. However, it is important to keep in mind geographic, spatial, or cost constraints for implementing large infrastructures such as vertihubs. The extensive search of support organizations allows us if it is impossible to build the vertihub at the selected location, to choose the second best point, and so on.

Summarizing, regarding the energy supply infrastructure, for plug-in charging systems, the model pointed out the need to build stations in the following PoIs: 6 chargers in vertiport A, 5 in vertiports B and C, and 4 in vertiports D, E, and G. For e-VTOL with the battery-swapping system, we must build 6 stations in vertiport A, 5 in vertiports B and C and 4 in vertiports D and G.

4.1. Systems Comparison

To compare the two different e-VTOL energy replenishment systems, we calculated the life cycle cost for both with the information already collected in the previous steps. Table 4 presents the breakdown of those costs and the total LCC of both systems. Spare parts costs from OPUS10 inventory and support network optimization refer to the initial provisioning of spare parts (CILS) and the depreciation of the LRUs (COMX) in the 20 years of the simulated life cycle.

We observed that the LCC of e-VTOL with a battery-swapping energy replenishment system was higher. This is mainly due to the cost of building the robotic GSE used in the activity and the cost of recycling or discarding the batteries. The provision of battery inventories for the operation also had a relevant impact on the total cost.

Table 4 - LCC breakdown and total LCC for both e-VTOL energy replenishment systems.

		Plug-In		Battery Swapping
CICM	$	28.000.000,00	$	19.200.000,00
CILS	$	132.900,00	$	271.400,00
COMX	$	6645,00 / year	$	13.570,0/year
CILX	$	560.000,00	$	12.000.000,00
COP	$	5.280.000,00	$	7.920.000,00
LCC	**$**	**34.105.800,00**	**$**	**39.662.800,00**

As the projects under development progress, more accurate data regarding costs, architecture, and reliability will be released and will be able to clarify and strengthen the calculation performed. In addition, demand surveys in São Paulo can directly influence the results obtained in allocating energy supply points for e-VTOL and in the comparison performed.

5. CONCLUSION

The proposed methodology allowed us to perform the optimal allocation of support and energy supply infrastructure support for UAM e-VTOL, considering Life Cycle Cost and meeting demand. In this work, we formulate the infrastructure allocation problem to determine the cost-effective allocation strategy for UAM e-VTOL support and energy supply infrastructure and validate its effectiveness in a case study in São Paulo.

The optimization model for the allocation of the infrastructure network obtained significant results for the planning of the UAM and a comparison between the different types of vehicles regarding the energy replenishment systems. The simulation of the proposed case study also generates inputs for e-VTOL developers and aeronautical authorities, as it demonstrates the feasibility or non-feasibility of the proposed Concept of Operations.

Furthermore, studies about the physical spaces available in the city for the construction of sites and the energy distribution network for the installation of charging stations are crucial for the foundation and validation of the results found by the proposed model. Information from these studies can be considered as restrictions in the optimization, aiming at improvements in the method.

Finally, we raise the importance of studies on the accuracy of the evolutionary algorithm used in the model. In future works, we must try to compare the same problem implemented with exact optimization algorithms or from a hybrid approach. Thus, the effect of random aspects involved in the Genetic Algorithm can be analyzed, and its implementation validated or evolved.

REFERENCES

Chandra, A., Lalwani, J., & Jajodia, B. (2021). Towards an Optimal Hybrid Algorithm for EV Charging Stations Placement using Quantum Annealing and Genetic Algorithms. arXiv preprint arXiv:2111.01622.

BLANCHARD, B. S.; BLYLER, J. E. System engineering management. 5th. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

Blank, J., & Deb, K. (2020). Pymoo: Multi-objective optimization in python. IEEE Access, 8, 89497-89509.

Deb, S., Tammi, K., Kalita, K., & Mahanta, P. (2018). Review of recent trends in charging infrastructure planning for electric vehicles. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 7(6), e306.

Dong, J., Liu, C., & Lin, Z. (2014). Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: An activity-based approach using multiday travel data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 38, 44-55.

Fadhil, D. N. (2018). A GIS-based analysis for selecting ground infrastructure locations for urban air mobility. Master's Thesis, Technical University of Munich.

German, B., Daskilewicz, M., Hamilton, T. K., & Warren, M. M. (2018). Cargo delivery in by passenger eVTOL aircraft: a case study in the San Francisco bay area. In 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting (p. 2006).

Grandl, G., Ostgathe, M., Cachay, J., Doppler, S., Salib, J., Ross, H., & Kallenberg, R. (2018). The future of vertical mobility sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035. Porsche Consulting. https://fedotov.co/wp-content/uploads/2018/03/Future-of-Vertical-Mobility.pdf.

Holden, J., & Goel, N. (2016). Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation. San Francisco, CA.

Jordán, J., Palanca, J., del Val, E., Julian, V., & Botti, V. (2021). Localization of charging stations for electric vehicles using genetic algorithms. Neurocomputing, 452, 416-423.

Kohlman, L. W., & Patterson, M. D. (2018). System-level urban air mobility transportation modeling and determination of energy-related constraints. In 2018 aviation technology, integration, and operations conference (p. 3677).

Kunith, A., Mendelevitch, R., & Goehlich, D. (2017). Electrification of a city bus network — an optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems. International Journal of Sustainable Transportation, 11(10), 707-720.

PYMOO. (2022, Aug 25). Multi-objective Optimization in Python (Pymoo) - GA: Genetic Algorithm Retrieved Aug 25, 2022, from https://pymoo.org/algorithms/soo/ga.html

SYSTECON. Opus Suite OPUS10 Manual, 2019.

Vieira, D. R., Silva, D., & Bravo, A. (2019). Electric VTOL aircraft: the future of urban air mobility (background, advantages and challenges). International Journal of Sustainable Aviation, 5(2), 101-118.

Wu, Z., & Zhang, Y. (2020). Optimal eVTOL charging and passenger serving scheduling for on-demand urban air mobility. In AIAA Aviation 2020 Forum (p. 3253).

Zheng, Y., Dong, Z. Y., Xu, Y., Meng, K., Zhao, J. H., & Qiu, J. (2013). Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning. IEEE transactions on Power Systems, 29(1), 221-229.

Gerenciamento do Fluxo do Tráfego Aéreo no Ecossistema da Mobilidade Aéreo Urbana

Jose Airton Patricio*, Rogerio, Yugo Takimoto, Agenir de Carvalho Dias
Atech Negócios em Tecnologias S/A

*** Corresponding author e-mail adress:** jpatricio@atech.com.br

PAPER ID: SIT233

RESUMO

O conceito de Mobilidade Aéreo Urbana (UAM) foi criado com o objetivo de reduzir o congestionamento urbano fornecendo uma demanda de voos curtos no espaço aéreo com zero emissão de poluentes através do uso de veículos elétricos de pouso e decolagem vertical (eVTOL). No longo prazo como mais voos (UAM), o controle do tráfego aéreo deverá ser feito de forma segura e eficiente. Na aviação comercial, a gestão do tráfego aéreo (ATM) é feito envolvendo tanto o controle de slots de acordo com a regulamentação, quanto com mudanças nos preços dos voos de acordo com o congestionamento ou negociação de slots. No entanto, como a dinâmica dos voos UAM é orientada através da demanda dos voos da aviação comercial, o controle de slots deve ser modificado levando-se em conta que a duração dos voos é bem menor quando comparado a aviação comercial. Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma nova proposta de slot para o UAM que correlacione a reserva do plano diretamente com os recursos do *vertiports* e também utilize a informação da previsão do tempo para a reserva.

Keywords: Mobilidade Aéreo Urbana (UAM), Tráfego Aéreo, Slot.

1. INTRODUÇÃO

Em virtude do crescimento das cidades, observa-se um aumento da densidade populacional fazendo com que a infraestrutura de transporte seja um desafio a ser superado. Nesse sentido foi introduzido o conceito de Mobilidade Aéreo Urbana (UAM). Este conceito é utilizado para poder expandir a rede de transporte incluindo voos curtos voltados ao transporte de pessoas e bens em áreas metropolitanas, Com isso, tanto empresas(Uber, 2022) como institutos de pesquisa (Nasa, 2022) estão abordando soluções para verificar a viabilidade de implantar este conceito em cidades e regiões próximas. Neste sentido, diversos estudos (Balakrishnan et al., 2018; MITRE, 2014; INRIX, 2022; Haddad et al., 2019; Ancel et al., 2017) mostram várias abordagens para permitir o deslocamento seguro e eficientes dos veículos elétricos e híbridos de pouso e decolagem vertical (eVTOL, hVTOL) no espaço aéreo urbano. As idéias propostas cobrem uma grande variedade de possibilidades como a de permitir o pouso de eVTOLs em *vertiports* instalados no topo de edifícios ou nas proximidades de trevos rodoviários (Wei et al., 2022).

A introdução dos voos dos eVTOLs, hVTOLs ou dos ”carros voadores”no cenário urbano exigirá, por parte dos provedores de serviços, uma nova visão de gerenciamento de fluxo para fazer frente às particularidades desses veículos no que diz respeito ao tráfego aéreo urbano. As limitações de autonomia desses novos usuários em função das necessidades de ciclos de recarga entre os *vertiports*, bem como o consumo elevado de energia nos casos de realização de *Holdings* em baixas altitudes, implicarão numa abordagem mais crítica do gerenciamento dos slots quando comparadas à sistemática de gerenciamento de slot aplicado na aviação comercial.

Portanto, por apresentar uma maior dinâmica quando comparado aos voos da aviação comercial, a abordagem do tráfego aéreo no contexto do UAM deve ser diferente. Este trabalho tem o objetivo de apresentar a abordagem do gerenciamento do tráfego aéreo na aviação comercial, apresentando uma proposta de o gerenciamento do tráfego aéreo no UAM com slots que estejam diretamente correlacionados aos recursos do *vertiports* com o plano de voo submetido. Esta proposta discute ainda a apresentação da revisão da oferta de slots de forma dinâmica considerando alguns cenários. A proposta apresentada tem como objetivo levar em conta a previsão do tempo e os fatores relacionados a manutenção dos recursos do *vertiport* para evitar que medidas que influenciem no voo submetido tenham que ser tomadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O gerenciamento seguro e eficiente do Tráfego Aéreo são pilares da aviação ao redor do mundo. Com o passar dos anos, sob o crescimento exponencial da malha aérea, os Provedores de serviços de navegação aérea (ANSP) perceberam que a eficiência não poderia ficar restrita somente ao Controle do Tráfego Aéreo (ATC). Apesar da proficiência do ATC, no que diz respeito a solução dos conflitos e a acomodação da demanda em período de tráfego aéreo intenso, gera-se um aumento da carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo (ATCO) e tripulações, bem como nos custos operacionais das empresas aéreas de forma significativa, em função da falta de previsibilidade dos voos e dos atrasos gerados para os passageiros.

Para responder a esses problemas, duas soluções podem ser adotadas: a aplicação de medidas de gerenciamento de demanda/capacidade ou a implementação de programas de melhorias da capacidade. Devido a complicações para expandir a capacidade de aeroportos existentes, soluções de gerenciamento de demanda tem recebido maior atenção de pesquisadores e operadores. O gerenciamento da demanda em aeroportos inclui uma ampla variedades de medidas, como as administrativas, envolvendo tanto o controle de slots de acordo com a regulamentação, quanto as econômicas e de mercado, envolvendo variações de preços de acordo com o congestionamento ou negociação de slots. Num ambiente de aeroportos congestionados, as medidas de balanceamento da demanda/capacidade é feita através dos slots pela alocação pré-definida de períodos de tempo para a aeronave pousar ou decolar (Cook, 2007) e permitir o uso dos recursos de um aeroporto coordenado. Essa alocação de slots não leva em

conta mudanças dinâmicas na capacidade devido a efeitos meteorológicos e outros fenômenos temporários. Além disso, como o número de slots alocados não pode ultrapassar a capacidade declarada do aeroporto (ICAO, 2018), em caso de uma situação de desbalanceamento entre o tráfego aéreo esperado e a capacidade disponível, os controladores de tráfego aéreo podem tomar diversas medidas para manter a capacidade do aeroporto. Essas medidas vão desde o atraso na decolagem das aeronaves, a mudança da rota utilizada pela aeronave e até mesmo a alteração da velocidade da aeronave (Ahamada et al., 2018).

Por outro lado, para as soluções UAM, disrupções não programadas como o fechamento de locais de pouso devido a condições climáticas precisam ser consideradas antecipadamente pois os voos são de curtas distâncias e por estarem sobrevoando áreas densamente povoadas. Neste sentido, apesar de existirem poucos trabalhos relacionados ao Tráfego Aéreo no UAM, algumas propostas para a alocação, estabelecer a capacidade, a reserva e o uso do espaço aéreo de forma segura foram discutidas em alguns trabalhos (Rigas et al., 2021; Wang et al., 2021; Wei et al., 2021; Chen et al., n.d.; Kleinbekman et al., 2018; Wei et al., 2022). Rigas et al. (2021) aborda o problema de planejar a alocação de uma aeronave para o passageiro maximizando o consumo de energia dessas aeronaves forçando elas a voarem na menor altitude possível. Wang et al. (2021) apresenta uma otimização de alocação do tráfego aéreo considerando a complexidade dos corredores aéreos urbanos. Wei et al. (2021) propõe um modelo de otimização para o planejamento dos serviços UAM considerando capacidades limitadas de pouso e tempos de voos incertos. (Chen et al., n.d.) determina a capacidade do espaço aéreo através de uma implementação de balanceamento de demanda e capacidade (DCB) para o UAM quando a incertezas das operações são altas. Kleinbekman et al. (2018) aborda a utilizaçao de um algoritmo de sequenciamento e agendamento para a chegada de múltiplos eVTOLs competindo com espaço aéreo e recursos de *vertiports* limitados. Wei et al. (2022) propõe algoritmo se a aeronave poderá pousar no destino sem violar a capacidade limitado de recebimento do voo pelo *vertiport*. Apesar dessas propostas, não existe nenhuma proposta que garanta de forma antecipada, no estratégico, a reserva do recurso no *vertiport* de forma antecipada para que não ocorra um problema de capacidade do *vertiport*.

3. DEFINIÇÃO DE SLOT NA AVIAÇÃO COMERCIAL

Na Europa, como a Unidade Central de Gerenciamento de Tráfego (CFMU) é responsável pelo gerenciamento do fluxo para garantir a capacidade dos setores e utiliza os slots. Esse gerenciamento é feito por um serviço conhecido como Gerenciamento do Fluxo do Tráfego Aéreo (ATFM) e tem como objetivo contribuir com a segura, ordenada e rápida do fluxo do Tráfego Aéreo. O ATFM é dividido em 3 fases:(Eurocontrol, 2003)

- A fase estratégica acontece entre 18 a sete dias antes do dia da operação e inclui pesquisa, planejamento e coordenação das atividades. Como resultado dessa fase tem-se a produção de entradas para a geração do plano de capacidade para o ano seguinte.
- A fase pré-tática é aplicada durante os 6 dias que antecedem a operação até o dia da operação e consiste no planejamento e coordenação das atividades. Como resultado dessa fase tem-se a produção de entradas para a geração do plano diário do ATFM.
- A fase tática é aplicada no dia da operação. Esta fase atualiza o plano diário de acordo com o tráfego e a capacidade. O gerenciamento do tráfego é obtido através da alocação do slot.

Para que aconteça o voo entre dois aeroportos, a companhia deve submeter o plano de voo para o CFMU. Este plano deve conter as seguintes informações:

- identificador da aeronave,
- aeroporto de decolagem,
- aeroporto de pouso,
- horário de decolagem desejado,
- lista de waypoints
- nível do voo associado para cada waypoint.

A partir das informações do plano de voo, a decisão de ativar o balanceamento da demanda de tráfego deve ser feita para os setores necessários (número de aeronaves superior a capacidade). Utilizando o princípio do primeiro que solicita é o primeiro servido (”First filed-First Served”), o sistema responsável verifica todos os voos desse espaço aéreo e faz a ordenação de modo que o voo entre no espaço aéreo sem restrições. Com base nisso, o horário de decolagem (TOT) é calculado e o TOT calculado (CTOT) é então transmitido para as companhias aéreas interessadas e a torre de controle do aeroporto de partida. No ATFM, o CFMU é reponsável pela alocação de slot para todos os voos e elabora o planejamento diário dos slots com base nos CTOTs. O slot corresponde a uma janela de tempo (-5 min, +10 min) do CTOT durante o qual a aeronave deve decolar. Infelizmente devido a eventos operacionais incertos (efeito climático, falha técnica, espera de passageiros,..) podem ocorrer diariamente eventos na gestão tática que pertubem o planejamento realizado pelo CFMU. Nesse caso, medidas adicionais devem ser tomadas para realocar os slots e garantir a capacidade. A fig. 1 mostra o planejamento e as fases do ATFM para a alocação dos slots e garantia da capacidade.

3.1. Gerenciamento Estratégico dos slots na na aviação comercial

Os aeroportos coordenados que fazem parte da Worldwide Slot Guidelines (WSG - IATA) declaram suas capacidades para as temporadas *Winter/Summer* com o objetivo de distribuir os slots de forma harmônica considerando as capacidades de pista e de pátio desses aeroportos.

No exemplo da Tab.1, temos o Aeroporto Internacional de Guarulhos (ICAO - SBGR) em São Paulo, com a sua capacidade declarada e os slots distribuídos para a temporada W22 (*Winter*).

Como pode ser observado no exemplo de SBGR, embora haja uma previsão de redução de capacidade, em função de manutenções programadas para determinadas janelas de operação, na maior parte do tempo, assume-se uma distribuição linear dos slots, o que na prática nem sempre é verdade.

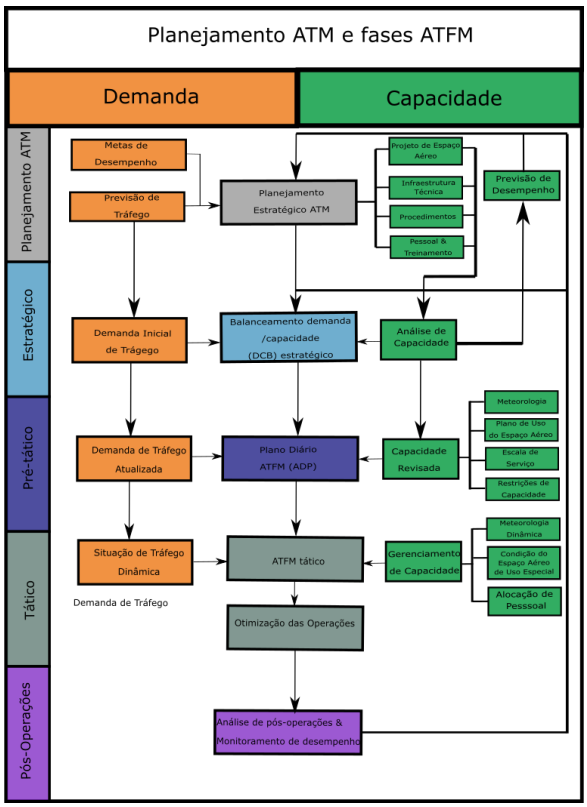


Figura 1 Fases do ATFM e planejamento de cada fase. Adaptado de ICAO (2018).

4. PROPOSTA PARA SLOT NO UAM

No ecossistema do UAM, toda a operação planejada estrategicamente por meio da submissão do plano de voo, bem como todas as mensagens de atualizações dos planos de voo, como Delay Message (DLA), Modification Message (CHG), e Cancellation Mesasage (CNL) devem refletir dinamicamente a reserva dos recursos nos *vertiports*.

Esse processo complexo envolve interações de sistemas que deverão ser realizadas por 3 subsistemas dedicados, mas interligados e que serão providos pelo PSU (*Provider of Services to Urban Air Mobility*) (Hill et al., 2020) dentro do contexto da capacidade do sistema.

Embora todo o gerenciamento dos slots no cenário urbano seja de responsabilidade do serviço de gerenciamento de fluxo, os serviços como os de gerenciamento dos recursos dos *vertiport*, o de autorização dos planos de voos, os de meteorologia e os de informações aeronáuticas também fazem parte do processo otimizado e eficiente da alocação dos slots.

Tabela 1 Capacidade do Sistema de Pistas de Pouso e Decolagem.
([1]Conforme NOTAM Vigente, as capacidades serão reduzidas entre 36 e 52 movimentos nos horários estabelecidos)

Hora	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Slots	58[1]	58[1]	58[1]	58[1]	58[1]	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58

Podemos definir um processo de alocação sistemática de slots pela submissão do plano, onde o usuário submete um plano de voo para a operação em determinado *vertiport*. Nessa submissão, o sistema de gerenciamento de plano de voo, antes de autorizar determinada operação, deverá realizar as seguintes atividades:

- **Validação dos dados da submissão:** Nessa etapa, o sistema deverá realizar as validações semânticas e sintáticas relacionadas aos dados de entrada informados pelo usuário. Nesse momento, verifica-se a compatibilidade do voo em relação às regras e requisitos mínimos para a operação que devem considerar não somente as características da aeronave/veículo, mas também os recursos disponíveis para a operação segura e eficiente. Todo o planejamento da capacidade requer o conhecimento do tipo da demanda prevista, assim como o tempo que essa demanda vai ser absorvida pela capacidade, ou seja, os dados de *Turn Around* previsto e os tipos de recursos necessários para a operação devem ser validados e transparentes no conceito do slot urbano.
- **Análise das condições meteorológicas presentes e futuras:** Concomitante ao processo de validação, o sistema deve realizar as chamadas necessárias para obter os dados meteorológicos atuais e futuros que impactem a operação. Eventos como baixa visibilidade, restrição de teto e outros fenômenos climáticos adversos devem ser considerados, uma vez que esses restringem a navegação para os pilotos e irão impactar a capacidade do espaço aéreo e dos *vertiports*, e consequentemente irão reduzir a oferta de alocação de slots;
- **Informações dos elementos do espaço aéreo e possíveis constraints:** Uma informação essencial durante uma submissão de um plano de voo é saber com exatidão a condição operacional dos recursos dos *vertiports* no que diz respeito à disponibilidade dos auxílios à navegação (NAVAID), restrições no espaço aéreo incluindo a suspensão/interdição de corredores e setores, ativação de espaços aéreos condicionados (EAC), etc. Essas informações auxiliam não só os usuários durante a submissão do plano de voo, mas principalmente alimentam o gerenciamento do fluxo, uma vez que esses eventos impactam diretamente a capacidade do sistema, e consequentemente, a oferta de slots.

Uma vez percorridas as atividades anteriormente mencionadas, o plano de voo submetido será a fonte principal de informação sobre a operação e todas as ações do gerenciamento de fluxo serão tomadas a partir dos dados validados.

4.1. Necessidade do gerenciamento tático dos slots no UAM

Enquanto na aviação comercial, a oferta e alocação dos slots baseiam-se nos valores de capacidades declaradas, por outro lado, o slot no contexto da UAM deve refletir a capacidade revisada.

Embora a capacidade declarada de um aeroporto ou de um *vertiport* seja de suma importância para o planejamento estratégico do gerenciamento de fluxo, uma vez que a oferta de slots está limitada à capacidade declarada pelo provedor, para efeitos de balanceamento da demanda e da capacidade (DCB), é necessário conhecer os valores reais da capacidade nas fases pré-tática e, principalmente tática.

Nesse sentido, a capacidade revisada considera a incidência dos diferentes tipos de constraints que vão desde a ocorrência de fenômenos meteorológicos, inoperância de auxílio à navegação, até a redução dos recursos disponíveis. Esses eventos podem ser parametrizados e tabulados previamente no sistema e a

ocorrência de um ou combinação de vários deles implica num fator de redução da capacidade declarada, obtendo dessa forma um valor revisado da capacidade.

Considerando-se o volume de operações futuras no UAM, associado à instabilidade do cenário urbano devido ao microclima e as restrições de espera em voo dos veículos, o slot no UAM deve refletir continuamente os impactos de natureza tática, no que diz respeito não só ao número de slots disponíveis, mas principalmente a capacidade dinâmica da alocação temporal dos recursos disponíveis.

4.2. Amplitude da janela de alocação dos slots no UAM

No caso do Brasil, de acordo com a ICA 100-41 (DECEA, 2017), a validade de um slot na na aviação comercial compreende uma janela de 15 min antes até 30 minutos após da hora alocada, o que na prática absorve pequenos atrasos na decolagem e no pouso, de forma quase que imperceptível nos grandes aeroportos.

No entanto, janelas de alocação com amplitudes como as do ATM podem não atender as necessidades do UAM, visto que a maior parte dos voos ocorrerão em cenários urbanos, alguns com duração entre 10 e 15 min.

Numa simulação realizada durante a EVE Rio Experience, em novembro de 2021, onde foram coletadas informações sobre a jornada dos usuários bem como dos operadores de frota, a finalidade era conectar a região da Barra da Tijuca, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, ao Aeroporto Internacional Tom Jobim (ICAO - SBGL).

Na simulação em questão, a duração média dos voos foi de 10 min, onde foram consideradas janelas de validade dos slots de $\pm$1min, em relção à hora alocada para pouso e decolagem, com a finalidade de simular a quantidade de slots que perderiam a validade em função dos ajustes na operação.

4.3. Atualização dos recursos disponíveis para revisão dos slots no UAM

A infraestrutura da aviação comercial e flexibilidade por parte de alguns usuários permitem, na maioria das vezes, a acomodação de voos com os seus horários atualizados, sem a necessidade de redimensionar um slot previamente alocado, isso se explica pelo fato de haver uma oferta considerável de recursos disponíveis nos grandes aeroportos, mas o mesmo não se pode afirmar se os *vertiports* contarão com a mesma estrutura.

No caso do UAM, os recursos necessários para a realização de um voo devem estar bem definidos desde a submissão do plano de voo e, qualquer atualização da disponibilidade ou alteração na reserva/alocação desses recursos que impactem direta ou indiretamente à capacidade, devem estar refletidos no cálculo dos slots.

4.4. Informações dos recursos necessários na submissão do plano de voo

Diferente da aviação comercial, onde as informações sobre os recursos necessários para a realização do voo não são objeto de análise nas validações semânticas e sintáticas, ou seja, ao obter um slot na aviação comercial para uma operação qualquer num aeroporto coordenado, o operador de frota entende que todos os recursos necessários serão fornecidos e estarão disponíveis no horário planejado, o UAM necessitará de informações atualizadas sobre os recursos disponíveis de forma a considerá-los na validação semântica do plano de voo submetido. Ainda que informações adicionais possam ser inseridas no campo *Remarks* (RMK) do item 18 do plano de voo ICAO, de acordo com as regras de preenchimento estabelecidas no Doc.4444 (ICAO, 2016), não está prevista a obrigatoriedade de o piloto informar os recursos necessários, bem como o tempo de utilização que se pretende operá-los.

Por outro lado, no cenário do UAM, de acordo com Nuair (2021), já na submissão do plano o operador de frota informa a descrição de quais serviços pretende utilizar junto ao provedor adequado e o tempo de permanência no *vertiport*.

4.5. Ambiente colaborativo para o gerenciamento dinâmico dos slots

Conforme mencionado em Hill et al. (2020) estimam-se 100 voos simultâneos. Com isso, não há dúvidas que essa previsão significativa do número de operações irá potencializar o transporte de pessoas e cargas dentro dos grandes centros, mas ao mesmo tempo irá criar um desafio para o gerenciamento do fluxo, uma vez que o tempo requerido para a tomada de decisão pode ser bem mais curto do que praticado na aviação comercial.

Nesse contexto dinâmico, onde o operador de frota pretende atender com eficiência e prontidão as solicitações dos usuários, os voos considerados *ON DEMAND* ou *NON SCHEDULED* vão exigir uma resposta rápida do sistema, uma vez que o diferença entre o tempo da submissão de um plano e a hora prevista de decolagem pode ser algo em torno de minutos.

Caso esse tipo de demanda se concretize, torna-se fundamental um modelo de negócios capaz de promover a troca de informações rápidas e precisas entre os stakeholders dentro de um ambiente colaborativo.

Devido a densidade elevada de tráfego no cenário urbano, os slots derivados da combinação dos recursos alocados nos *vertiport* deverão ser precisos e as janelas de utilização deverão ser cronometradas.

Portanto, numa operação real no UAM, quando um voo não for capaz de operar numa janela de tempo previamente coordenada, seja por razões operacionais, técnicas ou até mesmo de gerenciamento de fluxo, haverá um processo colaborativo entre o operador de frota, o PSU e o *vertiport* com a finalidade de acomodar o voo sem comprometer a segurança das operações.

A Tab.2 mostra uma comparação das principais características que devem ser levadas em conta para o slot na aviação comercial e no UAM.

Tabela 2 Tabela comparativa dos Slots na aviação comercial (AC) e no UAM (TBD: A ser definido)

Visão Comparativa		
Características	**Slot AC**	**Slot UAM**
Comportamento	Estático	Dinâmico
Capacidade de Referência para alocação	Utiliza a capacidade declarada	Utiliza a capacidade revisada
Fase do Gerenciamento do fluxo	Foco no estratégico	Todas as fases do gerenciamento, mas com o foco no tático
Janela de Validade do slot	15 min antes /30 min depois da hora alocada	TBD
Detalhamento dos recursos utilizados	Sem detalhamento	Detalhamento obrigatório desde a submissão do plano
Ambiente Colaborativo para oferta e alocação do slot	Ênfase no estratégico durante as definições das temporadas	Todas as fases, com ênfase no tático
Processo de alocação e atualização do slot	Automatizado	Automatizado
Regras de alocação do slot	Regras bem definidas	TBD

5. IMPACTO DA CAPACIDADE REVISADA NA OFERTA DE SLOTS

A Tab.3 apresenta 3 cenários hipotéticos para a revisão da capacidade de forma dinâmica

Cenário 1: O cenário hipotético apresenta a melhor configuração operacional para um dado *vertiport* sem a incidência de qualquer redutor da capacidade declarada. Nesse caso, de acordo com os dados temos:

DC = 10 Mov/h

RC = 10 Mov/h

NAS = Number of Available Slots = 10 Slot

Cenário 2: O cenário hipotético apresenta uma redução das condições climáticas implicando na mudança de uma operação VFR para IFR* nos mínimos. Em função dessa degradação meteorológica, a taxa de aceitação do *vertiport* diminui não só pela restrição da visibilidade na aproximação, mas também na superfície do *vertiport* devido à realização do taxi mais lento das aeronaves. Desse modo, supondo que essas restrições impactem os valores do MSAT e MTT

Tabela 3 Tabela paramétrica da capacidade revisada do vertiport (MSAT = Tempo Mínimo de aproximação padrão [Relativo a taxa de chegada do Vertiport - VAR], MTT = Tempo Mínimo de Rotação, MSDT = Tempo Mínimo padrão de Partida [Relativo à taxa de aceitaçã no espaço aéreo - AAR], TLOF = Nùmero de TLOFs disponìveis, WMI = Informaçã meteorolçõogica, DC = Capacidade Declarada, RC = Capacidade Revisada)

Cenários	MSAT[min]	MTT[min]	MSDT[min]	TLOF	Total Time[min]	DC[Mov/h]	RC[Mov/h]	NAS
Cenário 1	1	10	1	2	12	10	10	10
Cenário 2	2	12	1	2	15	10	8	8
Cenário 3	2	10	1	1	12	10	5	4

para 2min e 12min, respectivamente, teremos:

DC = 10 Mov/h

RC = 8 Mov/h

NAS = Number of Available Slots = 8 Slot

Cenário 3: O cenário hipotético apresenta uma indisponibilidade do recurso, nesse caso, há uma impraticabilidade de uma TLOF, que limita uma possível aproximação simultânea ou uma operação de pouso e decolagens em TLFO diferentes. Nessa configuração, para que o *vertiport* possa intercalar decolagens entre aproximações sucessivas e de forma segura, assumindo um aumento no MSAT para 2min, teremos:

DC = 10 Mov/h

RC = 4 Mov/h

NAS = Number of Available Slots = 4 Slot

Nota: Os dados considerados nesse cenário hipotético não levaram em consideração o número de stands, postos de recarga elétrica, número de taxiways, dentre outros recursos, com intuito de facilitar o entendimento. No entanto, esses recursos e outros parâmetros operacionais devem ser incluídos na metodologia de cálculo aplicada pelo provedor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo descreve o problema dos slots para o ecossitema da mobilidade aéreo urbana. A grande questão é a de que o slot da maneira como é utilizada na aviação comercial deverá ser revisto para o cenário UAM pois somente considera as capacidades de pista e de pátio desses aeroportos no estratégico. Para o ambiente UAM, um dos desafios é de que a rede possui recursos limitados no *vertiport* para atender a todas as aeronaves. Por esse motivo, o plano de voo deve considerar o recurso a ser utilizado antes de decolar para garantir que haja essa disponibilidade para que a aeronave possa utilizá-la ao pousar. Além disso, fatores meteorológicos também devem ser levados em conta para garantir que os voos curtos desse ecossistema possam estar utilizando o espaço aéreo de forma segura.

Referências

Ahamada, Y., Diagne, S., Kone, B., Koulibaly, A. & Gningue, Y. (2018). Optimization of time slots for the air-traffic management, Journal of Mathematics Research 10, 39.

Ancel, E., Capristan, F. M., Foster, J. V. & Condotta, R. C. (2017). Real-time risk assessment framework for unmanned aircraft system (uas) traffic management (utm) Anais do 17th aiaa aviation technology, integration, and operations conference, p. 3273.

Balakrishnan, K., Polastre, J., Mooberry, J., Golding, R. & Sachs, P. (2018). Blueprint for the sky: The roadmap for the safe integration of autonomous aircraft, Airbus UTM, San Francisco, CA.

Chen, S., Wei, P., Evans, A. D. & Egorov, M. (n.d.). Estimating Airspace Resource Capacity for Advanced Air Mobility Operations.

Cook, A. (2007). European air traffic management: principles, practice, and research, Ashgate Publishing, Ltd.,.

DECEA (2017). ICA 100-41 Regras de Alocaução de Slot para Aviação Geral em Aeródromos Coordenados Ministério da Defesa Brasília.

Eurocontrol (2003). ATFM Users Manual edition n.9.0 edition.

Haddad, C. A., Chaniotakis, E., Straubinger, A., Plötner, K., Constantinos & Antoniou

(2019). Identifying the factors affecting the use and adoption of urban air mobility.

Hill, B. P., DeCarme, D., Metcalfe, M., Griffin, C., Wiggins, S., Metts, C., Bastedo, B., Patterson, M. D. & Mendonca, N. L. (2020). Uam vision concept of operations (conops) uam maturity level (uml) 4.

ICAO (2016). Doc. 4444 - Air Traffic Management 2nd ed. edition The International Civil Aviation Organization (ICAO), Vienna, Austria.

ICAO (2018). Doc. 9971 - Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management 3rd ed. edition The International Civil Aviation Organization (ICAO), Vienna, Austria.

INRIX (2022). Vertical take-off and landing services potential study. Acessado em Ago 24, 2022.
URL: *https://inrix.com/learn/vtol-study/*

Kleinbekman, I. C., Mitici, M. A. & Wei, P. (2018). evtol arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility Anais do 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC), pp. 1–7.

MITRE (2014). Nextgen independent assessment recommendations.

Nasa (2022). Urban air mobility simulation - nasa. Acessado em Ago 24, 2022.
URL: *https://www.nasa.gov/simlabs/uam*

Nuair (2021). High-density automated vertiport concept of operations.

Rigas, E. S., Kolios, P. & Ellinas, G. (2021). Scheduling aerial vehicles in an urban air mobility scheme.

Uber (2022). Uber elevate. Acessado em Ago 24, 2022.
URL: *https://www.uber.com/br/pt-br/elevate*

Wang, Z., Delahaye, D., Farges, J.-L. & Alam, S. (2021). Air Traffic Assignment for Intensive Urban Air Mobility Operations, Journal of Aerospace Information Systems.
URL: *https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03082598*

Wei, Q., Nilsson, G. & Coogan, S. (2021). Scheduling of urban air mobility services with limited landing capacity and uncertain travel times Anais do 2021 American Control Conference (ACC), pp. 1681–1686.

Wei, Q., Nilsson, G. & Coogan, S. (2022). Safety verification for urban air mobility scheduling, IFAC-PapersOnLine 55(13), 306–311, 9th IFAC Conference on Networked Systems NECSYS 2022.

ANALYSIS OF ROUTES OVERLAPPING EFFECTS ON THE EFFICIENCY GAINS IN AIRLINE MERGERS

Eric Eduardo de Almeida*, Lucas Morotti dos Santos, Ana Beatriz Rebouças Eufrásio, Rogéria de Arantes Gomes
Aeronautics Institute of Technology, Department of Air Transport

*** Corresponding author e-mail address**: eric.almeida@ga.ita.br

PAPER ID: SIT195

ABSTRACT

Companies from several sectors may experience merger and acquisition initiatives (M&A) seeking improvements in productivity and reduction of costs. In the air transport industry, mergers may occur between companies with different degrees of competition. A suggested measurement of competition is the number of routes that are operated simultaneously by the companies, i.e., the routes overlapping. In order to investigate the effects of routes overlapping in the productivity gains for airlines in a merger process, we assess two pairs of airlines that have carried out a merger process: American Airlines/U.S. Airways and United Airlines/Continental Airlines. Data shows that the first merger involved companies with more routes overlapping than the second one. To compare productivity gains for these companies, a Cobb-Douglas production function relating RPM with ASM, number of employees, and fuel consumption was applied for a period of 12 months before the merger for all mentioned airlines, and for periods of 12, 24 and 36 months after the merger for the resulting companies. The data was obtained from the USA Bureau of Transportation Statistics. The results evidenced that the merger with more competition showed a diminishing return to scale just after the merger. However, in the following periods, there was increasing return to scale. In contrast, the merger with less previous competition showed increasing return to scale after the merger. These results suggest that when there was a merger between airlines that compete more, at the first moment, the resulting company experienced negative effects on its productivity probably due to difficulties to reduce inputs, or to proportionally increase the outputs, and to restructure the new company. The results also show that both resulting companies demonstrated gains in efficiency after the merger in the long run.

Keywords: Airlines merger, Routes overlapping, Theory of production, Cobb-Douglas

1. INTRODUCTION

The theory of production plays a fundamental role in the industry as a tool for the economic management of companies. This function aims to identify how the inputs are combined to generate a product or service most efficiently and what is the weight of each of them within the productive chain.

Productivity in air transport is defined as the relationship between the production, measured by the sum of the total number of transported passengers multiplied by their traveled distance (Revenue Passenger-Miles, RPM), and the inputs necessary for its achievement. The greater the relationship between the quantity produced and the inputs used, the higher the productivity (Barros, 2007).

Empirical studies of this nature can be useful for understanding the production structure of air transport companies. The production function can be a support tool for airlines managers since it helps in planning the allocation of resources (labor, materials, and equipment) to achieve better productivity. These functions can also predict and identify capacity expansion needs and choose strategic operating alternatives (Guterres and Correia, 2007).

Seeking improvements in productivity and reduction of costs, companies from several industrial sectors are experiencing merger and acquisition initiatives (M&A). The difference between a merger and an acquisition is that, in the first case, two or more companies join to create a new one, while an acquisition represents the purchase of one company by another one. Mergers and acquisitions among similar companies are denominated as horizontal mergers, aiming to increase efficiency and synergy through a larger market share and reduced costs. Mergers and acquisitions are alternative forms of exogenous growth. In general, a merger or an acquisition has a positive impact on the efficiency of airlines (Barros, Liang, and Peypoch, 2013).

The variations in infrastructure, staff, market share, among other factors, caused by mergers or acquisitions between airlines drive productivity fluctuations over time. Based on this approach, this study proposes the estimation of a Cobb-Douglas production function for two processes of M&A between airlines in the United States: American Airlines and US Airways, which began in December 2013 and was completed in October 2015 with the resulting company adopting the name of American Airlines; and United Airlines and Continental Airlines, which was consolidated in 2010 and made the United Airlines the largest airline at that moment (Shen, 2017).

Several factors may determine gains in efficiency when firms invest in M&A. According to Yan et al. (2019), airline mergers are expected to bring efficiency gains by aggregating the traffic volumes of the firms involved. Higher traffic volumes allow the use of larger and more efficient aircraft, besides a more intensive utilization of aircraft, airport facilities, and ground equipment with a possible reduction of average costs.

An essential determinant of efficiency gains with M&A is related to the level of competition before the merger, represented by the total quantity of routes simultaneously operated by both companies (routes overlapping). This study analyzes the effect of different levels of competition before the merger in the productivity gains obtained by the merged companies.

2. MERGERS, ACQUISITION, AND EFFICIENCY

The airline industry is known for providing frequent low profits and having a history of bankruptcy. Among the factors that contribute to this scenario are undue government regulation, network-driven structure, high labor cost, fuel and capital prices causing high variable and fixed costs, variation in demand due to seasonality, which results in revenue vulnerability, destructive competition, dependency on weather and other climate conditions, subjection to infrastructure conditions, and uneven competition due to state subsidies in other countries (Ingold 2003). To face this scenario, airlines have explored other sources of revenue such as charging ancillary fees, additional charges for food and beverage for economy passengers, extra fees for preferred seats and checked-in luggage for passengers who have not attained premium frequent flyer status, rebooking and cancellation fees (Manuela and Rhoades, 2014).

The challenges for the air transport industry lead airlines to invest in M&A, seeking to improve their profits since there may be an increase in revenues and improvements in non-labor costs, as pointed out by Hanlon (2007). Two long-term strategic motivations for mergers are growth and improvements in synergy. Firms choose M&A to seize critical opportunities since M&A tend to create synergy by either promoting savings or creating opportunities for revenue enhancement (Manuela and Rhoades, 2014). Reduction in average costs is an important result to be sought in an M&A decision. Ryerson and Kim (2014) point the late 2000s - early 2010s was a period of frequent mergers, partially caused by the rising fuel prices.

Mergers are widely studied in the literature. Manuela and Rhoades (2014) examined the announcement and post-merger effects of three US airlines mergers: America West and US Airways (2005), Delta and Northwest (2008), and United and Continental (2010), and found that there was even an increase (United, America West, Continental) and decrease (Delta and Northwest) in the share prices of these companies. However, factors related to the economic scenario when the mergers were revealed may have influenced the effects of the announcement on the companies' share prices.

By looking at an operational aspect of the companies involved in a merger process, Ryerson and Kim (2014) investigated how fuel costs may be reduced with mergers. The authors noted that after the merger, companies might reorganize their network structure, allowing them to transfer flows at the same time costs are reduced due to economies of scale. In this way, operations are consolidated while the companies' connectivity is maintained. Ryerson and Kim (2014) found that reduction of the fuel consumption by the companies overcame possible degradation in the passenger service level.

Several studies have been carried out to determine if M&A results in airline productivity improvements. By analyzing the merger of Chinese airlines, Yan et al. (2019) found that the mergers increased the productivity of the involved companies. For Johnston and Ozment (2013), major US airlines experienced increasing returns to scale with this process. On the other hand, some studies identify mergers that do not result in gains in productivity. Fregnani et al. (2019) encountered diseconomies of scale in the acquisition of Webjet Linhas Aéreas by GOL Linhas Aéreas, suggesting increasing costs due to the duplication of administrative features of the two companies in the years right after the merger. Similarly, Gudmundsson et al. (2017), by analyzing 19 M&A processes, concluded that mergers might have caused increasing in costs when they involved airlines with a large difference in their size.

Regarding the complementary of routes, Shaw and Ivy (1994) studied the effects of mergers in the network strategy and identified three classifications for the merged networks: single carrier dominant, overlapping, or complementary. The single carrier dominant pattern results when the cities of a merged network are overwhelmingly dominated by only one of the two carriers. Complementary networks are those in which the main attended cities of the individual carriers contribute equally to the main cities list for the merged network. Overlapping networks happen when the hubs for the individual carriers are somewhat similar. Shaw and Ivy (1994) conclude that no merger pattern is clearly best under all circumstances and that other factors such as financial position, congestion, employee relations, etc., also play a role in the subsequent decisions on the adjustments of hubs and linkages.

Studies of the effects of competition in mergers are frequent; however, the focus of the majority is on price formation. Shen (2017) demonstrated that after the United and Continental merger occurred, the resulting company increased airfares significantly in nonstop markets where they previously competed, despite the US Department of Justice (DOJ) had approved the merger expecting that the small number of overlap routes between these airlines would generate significant efficiency gains for consumers. On the other hand, Luo (2014) concluded that the prices for airport pairs where Delta and Northwest competed before the merger did not increase much following the merger.

Different from the focus of Shen (2017) and Luo (2014), this paper intends, through a study case, to analyze the effects of different levels of previous routes overlapping in

productivity gains after the merger by calculating the production functions of the involved companies before and after the merger' conclusion. This study considers the mergers of American Airlines and US Airways (2015) and United Airlines and Continental Airlines (2010), using monthly data from three years before and after each merger.

3. METHODOLOGY

3.1. The Cobb-Douglas Function

The Cobb-Douglas production function represents the relationship between an output and the various inputs. It is possible to analytically estimate the production function through an exponential model that allows the analysis of the theory of marginal productivity simply and efficiently. Equation (1) expresses the Cobb-Douglas production function in its simplest format.

$$Q = AK^{\beta 1}L^{\beta 2} \quad (1)$$

Where Q represents the production (output), K and L represent the inputs, A is the constant number of the function, and β_1 and β_2 are the elasticity parameters. In Equation (1), the relation between production and the two inputs is not linear. However, a logarithmic transformation is made in this model according to Equation (2).

$$ln\,(Q) = \alpha + \beta_1 \ln(K) + \beta_2 \ln(L) \quad (2)$$

Equation (2) is the linear format of the production function. It allows the application of the ordinary least squares method using a set of historical data for the output and the selected inputs to estimate the elasticity parameters β_1 and β_2.

An important property of this function is that if all inputs are multiplied by a factor μ, the Q function will be multiplied by μr where $r = \Sigma_i^n \beta_i$ represents the returns to scale (or factor of homogeneity). When r = 1, the returns to scale are constant. When r < 1, there is a diminishing return to scale, and when r > 1 represents an increasing return to scale (Fregnani et al., 2019). From the traditional economics perspective, returns to scale are a characteristic of a particular production function. They describe the impact of scaling all inputs up or down in constant proportions on the output. Increasing return to scale refers to a more than proportional change in output for a given change in inputs, diminishing return to scale refers to a less than proportional change in output for a given change in inputs, and constant return to scale refers to a proportional change in output for a given change in inputs (Johnston and Ozment, 2013).

3.2. Research Approach

This section presents the proposed methodology to analyze the production of the airlines before and after the merger. The study analyzed two mergers two mergers involving companies with different levels of routes competition, or overlapping, with the intent of verifying how the merger impacted their productivity gains, *ceteris paribus*.

3.2.1. Data

The literature review and the available public data allowed selecting the variables to compose the proposed production function. RPM (Revenue Passenger Mile) was selected to represent the output, and ASM (Available Seat Miles), Employees, and Fuel Consumption were selected to represent the inputs that influence the production results. These are:

RPM (Revenue Passenger-Miles): refers to the number of passengers and the distance flown, i.e., the sum of the product between the number of passengers and the distance of all ranges flown. It is a dependent variable used as output in the function, representing the production.

ASM (Available Seat-Miles): refers to the number of seats and the distance flown, i.e., the sum of the product between the number of seats offered and the distance of all ranges flown. It is an independent variable used as input in the function.

Employees (Full-Time Equivalent Employees): refers to the number of Employees FTEE (count two part-time employees as one full-time employee) of the airlines. It is an independent variable used as input in the function.

Fuel consumption: refers to the fuel consumption (in gallons) by the total scheduled service, considering domestic and international aviation. It is an independent variable used as input in the function.

The data were obtained through the Bureau of Transportation Statistics - BTS, which publishes data related to transportation in the United States. The collected data were extracted from the BTS website without the need for any specific treatment. The data for the variables are monthly reported ranging from 36 months before and after each merger. The same data range was adopted for both periods before and after the merger to keep the symmetry of the analysis. The 36-month period was chosen so as not to bias the result due to factors other than the merger itself.

The data for the routes overlapping analysis were collected from the Bureau of Transportation Statistics – BTS website for domestic flights, considering the last quarter before the two processes of merger present in this analysis.

3.2.2. Proposed Model

Two mergers with different levels of routes overlapping are analyzed. For each one, to estimate the impact of the merger in the production of air transport units (expressed in terms of RPM), it is proposed the analysis of the variation of the multi-linear regression parameters (production elasticity parameters) through Equation (3). The results obtained by this model to the elasticities βi are considered in a *ceteris paribus* hypothesis.

$$\ln(RPM) = \alpha + \beta_1 \ln(ASM) + \beta_2 \ln(FTEE) + \beta_3 \ln(FUEL) \quad (3)$$

where:
RPM: Revenue Passenger-Miles.
ASM: Available Seat-Miles.
FTEE: Full-Time Equivalent Employees.
FUEL: Fuel consumption in gallons.

3.2.2.1.US Airways and American Airlines

For the analysis over time, one scenario for US Airways, currently a non-existent company, was established, which investigates how the firm performed 36 months before the conclusion of the merger, that is, from July 2012 to June 2015. For American Airlines, it was established four scenarios. The first one analyses how it performed 36 months preceding the merger; the second one analyzes how it was from the merger up to 12 months ahead; the third one analyzes its performance from the merger up to 24 months ahead, and the last scenario analyzes how was its performance from the merger up to 36 months after it.

3.2.2.2.United Airlines and Continental Airlines

Similarly, as performed in the analysis of the US Airways and American Airlines merger, in the case of Continental, the analysis was performed with data from 36 months before the merger. For United Airlines, there were four scenarios: the first one contained data from 36 months before the merger, the second analyzes 12 months after the merger; the third looks at 24 months after the merger; and the fourth, 36 months after the merger.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

This section presents a descriptive statistical analysis of the dataset and the results of applying the Cobb-Douglas production function.

4.1. Routes Overlapping

Table 1 shows the statistics of routes overlapping for the two mergers in analysis. It is possible to see that the merger between American Airlines and US Airways involved a greater overlapping of routes (56%) than the merger between United Airlines and Continental (31%).

Table 1 Routes Overlapping Statistics during the last quarter before the merger

American Airlines routes	905
American Airlines routes in common with US Airways	505
Routes Overlapping	56%
United Airlines routes	1203
United Airlines routes in common with Continental	368
Routes Overlapping	31%

As observed by Chen e Gayle (2018), even before the merger, United and Continental were seen as complementary companies since both had similar fleets and explored different geographical regions, with United Airlines more present in the west of the United States and Continental more present in the east. This behavior can be observed in 3 and Figure 4. These figures show the routes departing from the five main hubs before the merger, which were identified according to the number of destinations. Figure 1 and Figure 2 show the same information for American Airlines and US Airways, respectively. One can see that the geographical regions explored coincide more than the Continental and United Airlines routes.

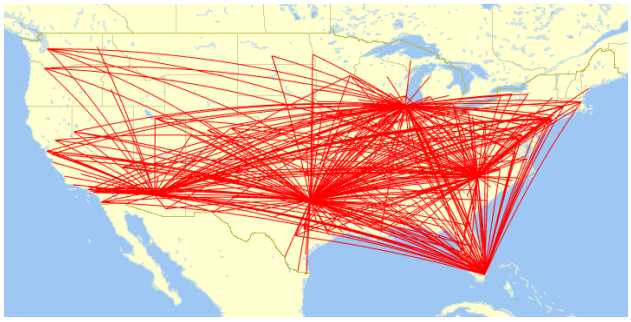


Figure 1 American Airlines' routes from five main hubs

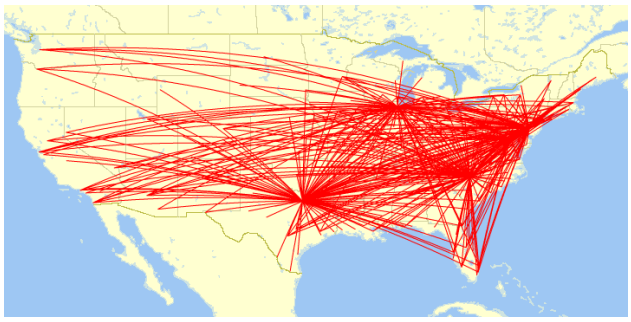


Figure 2 US Airways' routes from five main hubs

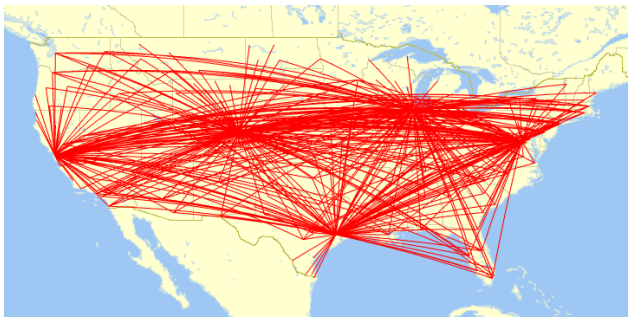


Figure 3 United Airlines' routes from five main hubs

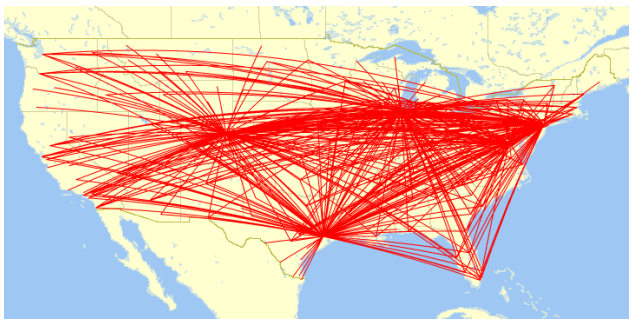


Figure 4 Continental's routes from five main hubs

The routes exhibited on maps of Figure 1 to Figure 4 represent, respectively, 32%, 29%, 26% and 29%, of total number of routes for American Airlines, US Airways, United Airlines and Continental.

4.2. Database Statistics for American Airlines and US Airways Merger

Figure 5 and Figure 6 show, respectively, graphics of RPM evolution and the number of employees for American Airlines and US Airways, before and after the merger. By analyzing the evolution of RPM in the last cycle of 12 months before the merger, both companies showed stability in the level of production compared to the previous year. Regarding the number of Employees, both companies showed an increase in their number one year before the merger.

Figure 7 shows the relation between the RPM and the number of employees for American Airlines before and after the merger. It is possible to see that the trend line is stable before the merger and with a positive slope after the merger. Two factors are potential justifications for this frame presented by the companies. The first is that they were already adapting to the merger before it was effectively completed; the other is that the companies no longer presented very interesting financial results. According to Peterman (2014), the unfavorable financial health was one of the justifications for the companies effectively to conclude the merger since this transaction would create the largest airline in the United States, which left regulators worried as this could potentially harm the sector's competitiveness.

Figure 8 shows the relationship between ASM and RPM, and Fuel Consumption and RPM for American Airlines, before and after the merger.

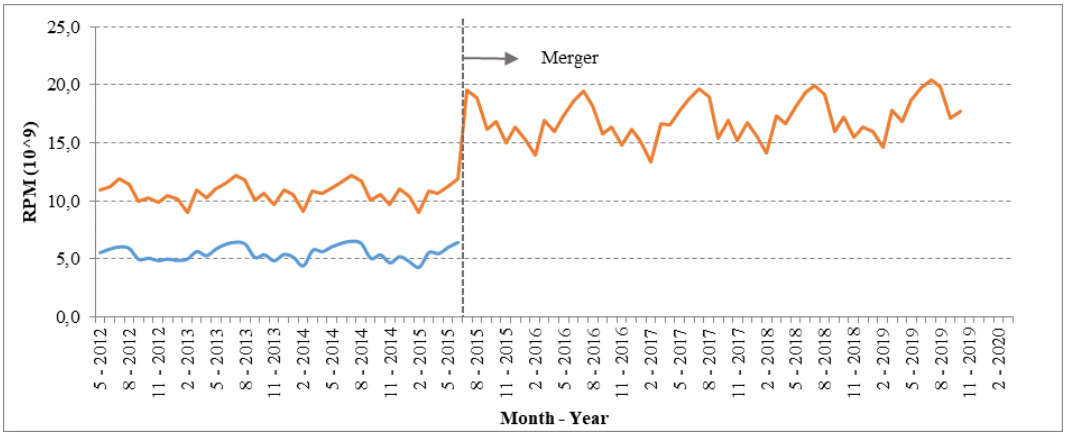


Figure 5 American Airlines and US Airways' RPM evolution

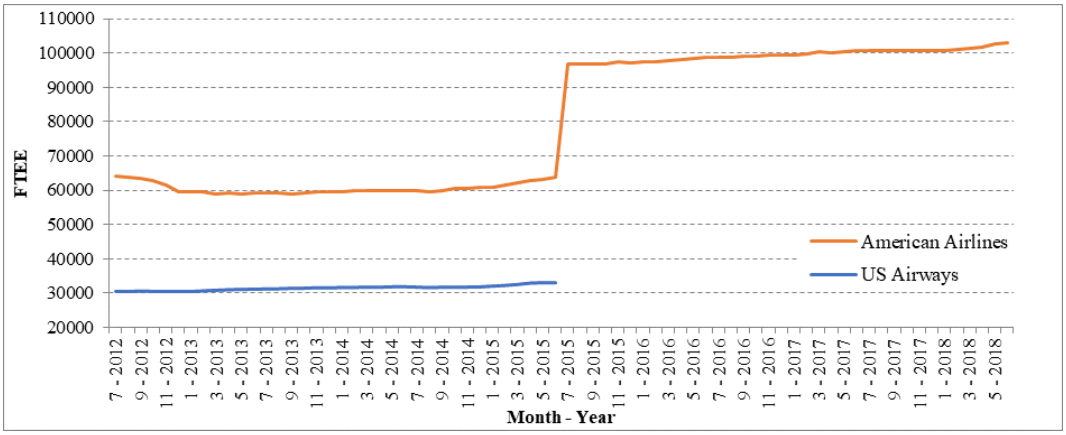


Figure 6 American Airlines and US Airways' employees' number evolution.

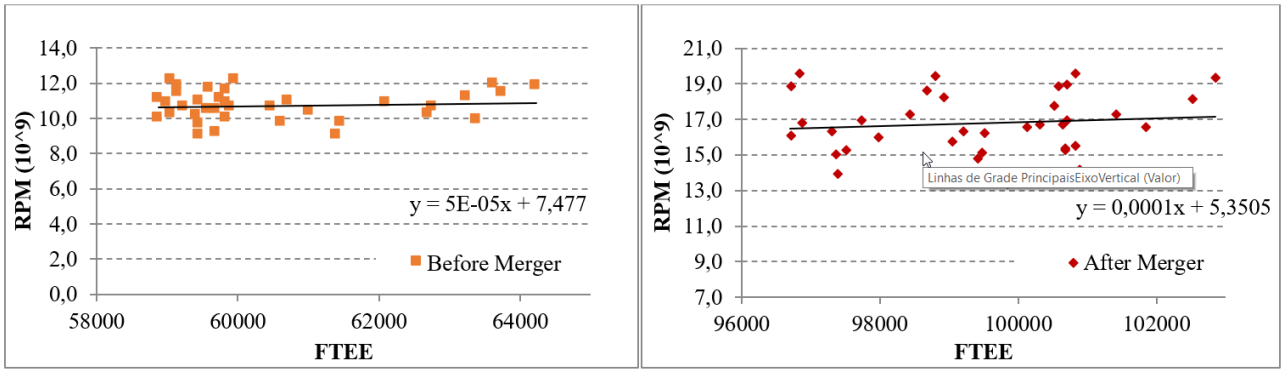


Figure 7 Relationship of FTEE and RPM before and after the merger (American Airlines)

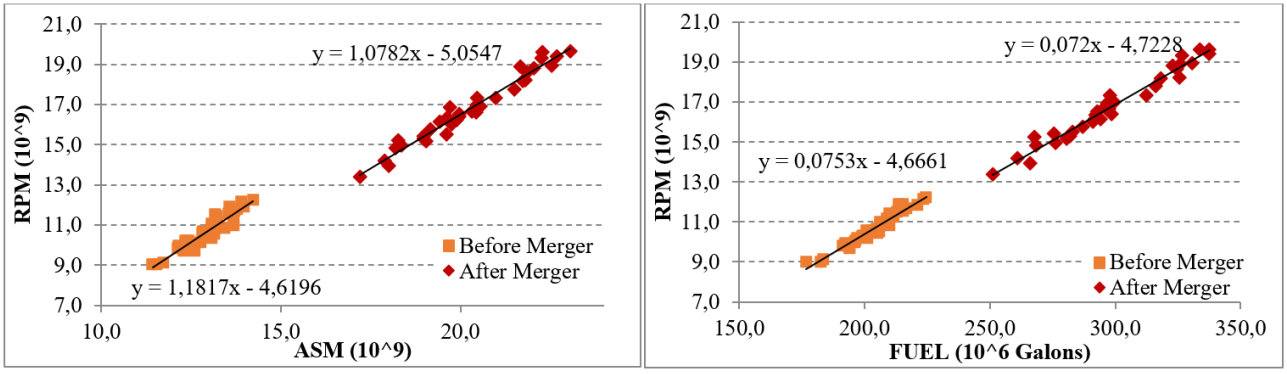


Figure 8 Relationship of ASM and RPM and of Fuel and RPM before and after the merger (American Airlines)

4.3. Database Statistics for United Airlines and Continental Airlines Merger

Figure 9 shows the evolution of RPM for United Airlines and Continental before and after the merger, and Figure 10 depicts the evolution of the number of employees for both companies, also before and after the merger. The curve for United indicates a decreasing trend in the number of employees from the merger until 36 months after it.

Figure 12 shows the effects of variation of the considered inputs over the RPM before and after the merger. On the left, one can observe the evolution of the indicator of production RPM in relation to ASM. The graph on the right indicates the evolution of RPM in relation to fuel consumption.

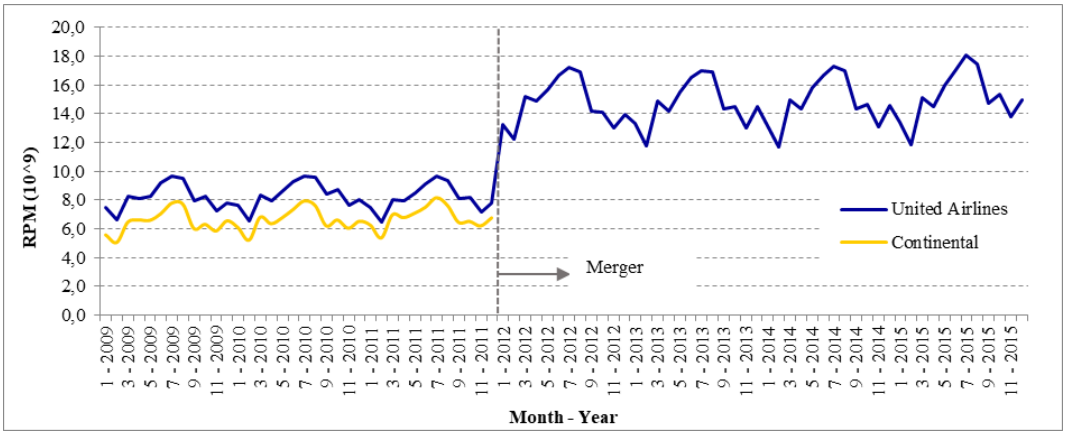


Figure 9 United Airlines and Continental RPM evolution

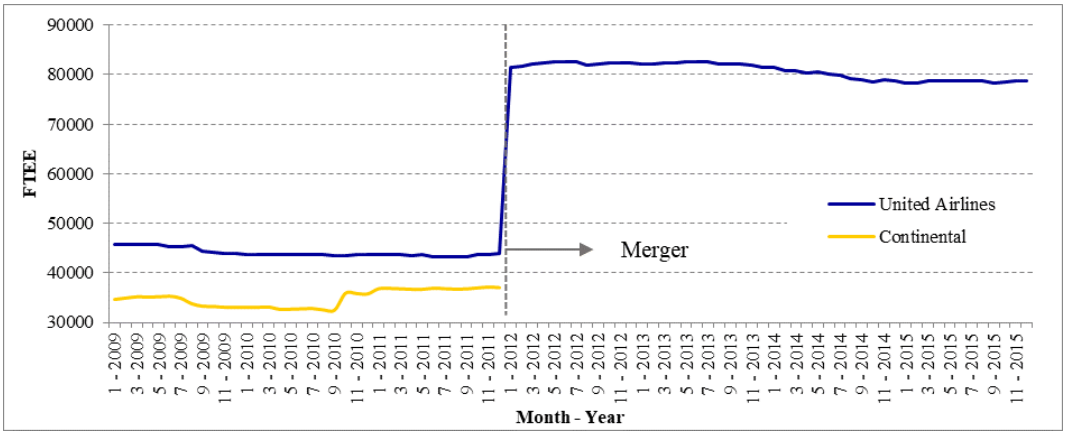


Figure 10 United Airlines and Continental employees number evolution.

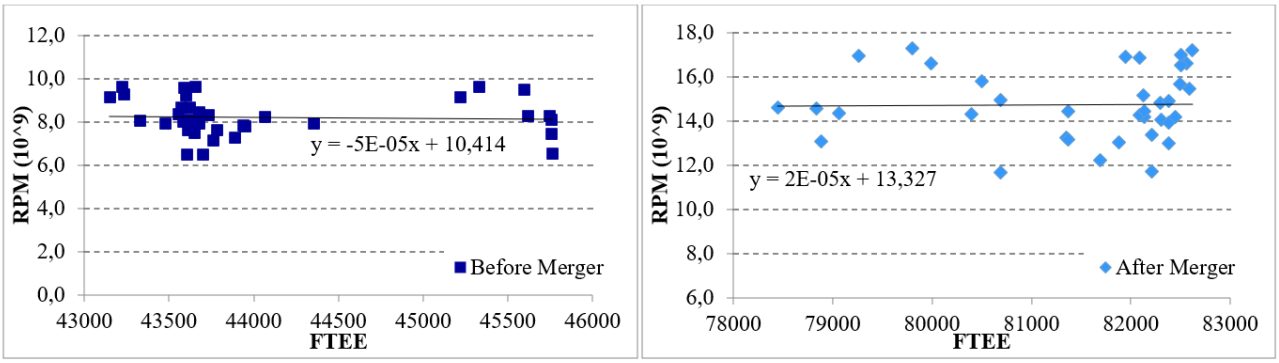


Figure 11 Relationship of FTEE and RPM before and after the merger (United Airlines)

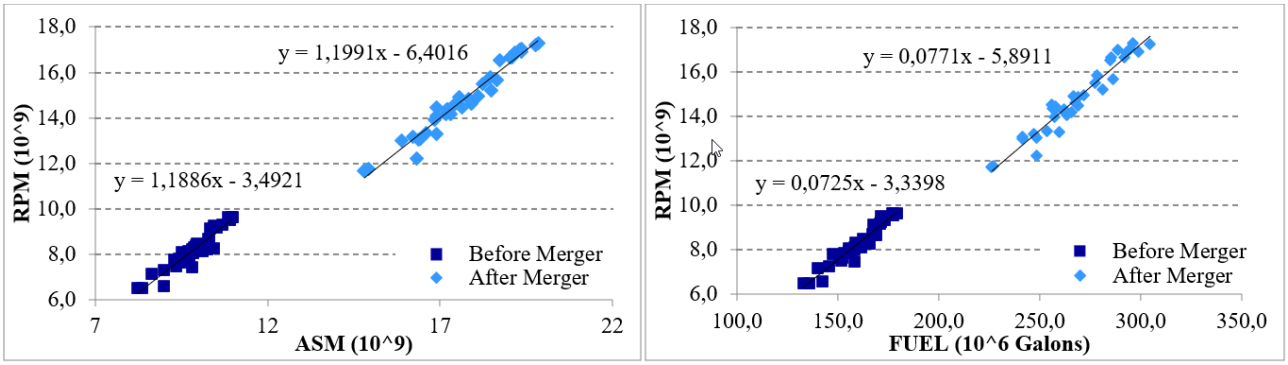


Figure 12 Relationship between ASM and RPM and between Fuel and RPM before and after the merger (United Airlines)

4.4. Application of the Cobb-Douglas Production Function

The hypothesis of the study is that the incorporation of fixed and variable inputs caused by the merger of the two companies directly affects the production of the companies before and/or after the merger. This factor should be observed by the behavior of the RPM (Revenue Passenger-Miles) in function of the Available Seats-Miles (ASM), Fuel Consumption, and Employees through the regression base on the Cobb-Douglas proposed model on a time scale that includes the periods before and after the merger. The variation in productivity caused by the merger can be affected by many variables, including the overlapping proportion of the routes from both companies before the merger.

This study proposes the application of a production function for the companies before and after the merger to investigate the impact of the merger on productivity and to understand the effect of the overlapping *ceteris paribus*. In the case of US Airways and Continental Airlines, the application of the production function was performed only for the period before the merger.

Table 2 US Airways and American Airlines RPM elasticity before the merger.

Regression Coefficients		US Airways 36 months before the merger 07/2012 - 06/2015	American Airlines 36 months before the merger 07/2012 - 06/2015
Intercept	α	0,822	-8,198
ln (ASM)	β_1	1,001	-0,192
ln (FTEE)	β_2	-0,513	0,436
ln (FUEL)	β_3	0,233	1,618
R^2		0,970	0,968
Homogeneity factor		**0,722** Diminishing return of scale	**1,862** Increasing return of scale

Table 3 United Airlines and Continental Airlines RPM elasticity before the merger.

Regression Coefficients		United Airlines 36 months before the merger 01/2009 - 12/2012	Continental 36 months before the merger 01/2009 - 12/2012
Intercept	α	2,548	-3,328
ln (ASM)	β_1	0,937	0,666
ln (FTEE)	β_2	-1,035	-0,390
ln (FUEL)	β_3	0,518	0,800
R^2		0,951	0,938
Homogeneity factor		**0,420** Diminishing return of scale	**1,076** Increasing return of scale

4.4.1. American Airlines and US Airways Before the Merger

The period analyzed for US Airways and American Airlines is from July 2012 to June 2015, 36 months before the merger. The results are shown in the Table 2.

The regression shows that, *ceteris paribus*, the elasticities of the inputs presented in order of importance and module, were the ASM, employees and fuel consumption for US Airways, and fuel consumption, employees, and ASM for American Airlines. Also, the chosen model for production presented R^2 greater than 0.96 for both companies.

Another result presented by the regression is that US Airways showed a diminishing return to scale before the merger, while American Airlines presented an increasing return to scale.

4.4.2. United Airlines and Continental Before the Merger

Considering the results from data of 36 months before the merger, the *ceteris paribus* results presented in Table 3 indicate that for United Airlines, there was a diminishing return to scale. For Continental, there was an increasing return to scale.

Table 4 American Airlines RPM elasticity effects after the merger.

Regression Coefficients		12 months after the merger 07/2015 - 06/2016	24 months after the merger 07/2015 - 06/2017	36 months after the merger 07/2015 - 06/2018
Intercept	α	9,358	-3,256	-5,856
ln (ASM)	β_1	0,600	0,375	0,236
ln (FTEE)	β_2	-1,445	-0,060	0,286
ln (FUEL)	β_3	0,847	0,953	1,051
R^2		0,987	0.978	0.974
Homogeneity factor		**0,003** Diminishing return to scale	**1.268** Increasing return to scale	**1.573** Increasing return to scale

Table 5 United Airlines RPM elasticity effects after the merger.

Regression Coefficients		12 months after the merger 01/2012 - 12/2012	24 months after the merger 01/2012 - 12/2013	36 months after the merger 01/2012 - 12/2014
Intercept	α	-56,736	-29,947	-8,618
ln (ASM)	β_1	0,262	1,089	1,357
ln (FTEE)	β_2	4,700	1,891	-0,123
ln (FUEL)	β_3	1,070	0,323	0,072
R^2		0,970	0,950	0,959
Homogeneity factor		**6,032** Increasing return to scale	**3,303** Increasing return to scale	**1,307** Increasing return to scale

4.4.3. American Airlines and Us Airways After the Merger

For the post-merger period, the study adopted three scenarios so that it was possible to analyze the results through shorter periods (less accurate, but allows the analysis of specific events), and longer periods (more accurate, but not able to identify very specific events).

- The first scenario considered the period from July 2015 to June 2016, equivalent to 12 months after the merger.
- The second scenario considered the period from July 2015 to June 2017, equivalent to 24 months after the merger.

- The third scenario considered the period from July 2015 to June 2018, equivalent to 36 months after the merger.

From Table 4, in the first scenario, the regression showed that, *ceteris paribus*, the elasticities of the inputs, presented in order of importance and module, were employees, fuel consumption, and ASM. The number of employees presented considerable representativeness in the production.

In the 12-month period after the merger, the number of employees continued to grow steadily. However, during the pre-merger period, the two companies increased their staff while productivity fell. These results suggest that the number of employees had a significant and negative impact on the productivity of the merged company.

In the second and third scenarios, the regression showed similar elasticities for the inputs, which presented the same order of importance for both: Fuel Consumption, ASM, and Employees.

Regarding the R^2 of the three scenarios, it is possible to observe that the chosen model for production presented R^2 greater than 0.97 in all three considered periods.

The return to scale achieved through the regressions agrees with some previous studies that suggested that when two companies undergo major acquisitions or mergers, the first post-merger period is expected to be accompanied by a decrease in productivity. This is expected since there is a need to reorganize the infrastructure, services, etc. Through these concepts, it can be observed that the first period presented a diminishing return to scale. This trend was also observed by Fregnani et al. (2019). The second period showed an increase, and the third indicated an even bigger increasing return to scale than the second. This result indicates that the company achieved improvements in the efficiency of its inputs over the years after the merger. This result can be compared with Johnston and Ozment (2013), which also indicates that mergers improve firms' productivity in the long run. Figure 13 shows the evolution of productivity graphically. In Figure 13, the dotted line indicates a constant return to scale. All the above points (in green) mean increasing return to scale, and below (in blue) mean diminishing return to scale.

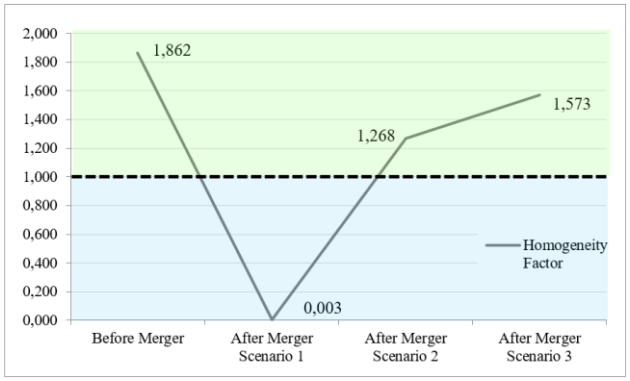


Figure 13 Homogeneity Factor Variation of American Airlines.

4.4.4. United Airlines and Continental Airlines After the Merger

Following the same analysis procedure performed for American Airlines and US Airways, three scenarios representing three different periods after the merger between United Airlines and Continental were analyzed: 12, 24, and 36 months after the merger. Table 5 shows the results (ceteris paribus).

From the results shown in Table 5, it is possible to see that the Employees was the variable with the greatest elasticity in the first scenario, followed by Fuel consumption and ASM. The second scenario also had the Employees as the factor that most contributed to the company's productivity. The third scenario had the ASM as the greatest level of importance in productivity. In all cases, the high values of R^2 indicate a good adjustment of the model to the data.

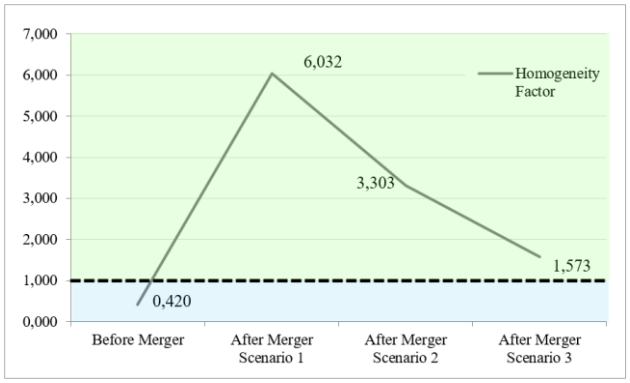


Figure 14 Homogeneity Factor Variation of United Airlines.

Unlike the merger between US Airways and American Airlines, the first scenario here showed an increasing return to scale 12 months after the merger, and the homogeneity factor

showed its greatest value. In the scenarios of 24 and 36 months, the resulting company continued to show increasing return to scale but with decreasing values when comparing each scenario with its previous one. Figure 14 represents the evolution of the homogeneity factor before the merger and in the three periods analyzed after it. The higher values after the merger suggest that it brought benefits in terms of economy of scale in the short and the long run, also aligned with the results of Johnston and Ozment (2013).

4.4.5. Comparison between the two merger results

Through the results presented in the topics above, it is possible to compare both merger processes. The merger of companies with greater competition in terms of routes, i.e., American Airlines and US Airways, presented a diminishing return to scale in the first period analyzed after the merger. However, in the following periods, the homogeneity factor increased, indicating increasing return to scale. On the other hand, the merger with fewer routes overlapping, i.e., United and Continental Airlines, presented an increasing return to scale after the merger, with the highest value obtained for the homogeneity factor in the first 12 months after the merger. This result may be associated with the information presented in Figure 10, which shows that United Airlines initiated a process of reducing its number of employees after the merger, differently from American Airlines, which continued to hire after the merger, as shown in Figure 6. Observing the coefficients obtained through the regressions with data after the mergers, the number of employees was the variable that most contributed to reduce the homogeneity factor for American Airlines. Contrarily, it was the variable that most contributed to increase the homogeneity factor for United Airlines.

The results for the Fuel variable indicate that for the merger with more overlapping routes (American Airlines), the coefficients βi present increasing values over time, suggesting that it contributes more to the increasing values of the respective homogeneity factor. In this sense, a higher level of routes being operated simultaneously by the merged companies provides more space for a reorganization of the network, as indicated by Ryerson and Kim (2014), which, according to the authors, lead to fuel consumption reduction. Indeed, Ryerson and Kim (2014) projected hub structure and consolidation of flows for the American Airlines-US Airways merger and found a potential fuel consumption savings of 23 to 27 percent.

Overall, the application of the Cobb-Douglas production function for these two mergers of companies with different levels of competition showed different results, depending on the period analyzed. When there was more previous competition, the resulting company showed less efficiency at the first moment since the results indicate a diminishing return to scale. A possible explanation is that the total inputs originated from the sum of inputs from both original companies did not propitiate a proportional increase in its production. On the other hand, when fewer routes were overlapping, the resulting company showed an immediate gain in productivity since the production function indicates an increasing return to scale. This increase may be understood since United Airlines became a larger company with more assets and was able to increase its products proportionally.

5. CONCLUSIONS

Estimating a Cobb-Douglas production function of the associated coefficients before and after the merger between two companies has proven to be an effective method for evaluating the effects caused by the merger. This study analyzed two mergers with different levels of previous competition and allowed to compare the results of the production function application for each merger process. The results evidenced that, in the first period after the merger, the one with less previous competition showed an increasing return to scale. In contrast, the other showed a diminishing return to scale, i.e., when there was a merger between airlines that compete more, at the first moment, the resulting company experienced negative effects in its productivity probably due to the difficulties for reducing inputs and structuring the new company. It means that incorporating a new company that is an effective competitor is not easier than incorporating one complementary in the market. The results also show that both resulting companies demonstrated gains in efficiency after

the merger in the long run. Other factors affect production and may not be included in the selected inputs of this study. Future studies may investigate the impact of other inputs to confirm this analysis and analyze different mergers.

References

American Airlines. (2018). *History of American Airlines:* 2010s. Available at: <https://www.aa.com.br/i18n/customer-service/about-us/history-of-american-airlines.jsp>. Accessed on: June, 1st. 2018.

Barros, J. R. S. N. (2007). *Custos no transporte aéreo: determinantes e modelos*. Journal of Transport Literature, vol. 1, n. 2, pp. 70-109.

Barros, C. P., Liang, Q. B., & Peypoch, N. (2013). *The technical efficiency of US Airlines*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 50, 139-148.

Bureau of Transportation Statistics – BTS (2020). *United States Department of Transportation*. Airlines and Airports. Available at: <https://www.bts.gov/node/221021>. Accessed on: May 25th. 2020.

Chen, Y.; Gayle, P. G. *Mergers and product quality: Evidence from the airline industry*. International Journal of Industrial Organization, 2018.

Cobb, C. W., & Douglas, P. H. (1928). *A theory of production*. The American Economic Review, 18(1), 139-165.

Fregnani, J. A. T. G., Orra, T. H., Eller, R. D. A. G., & de Mattos, B. S. (2019). *The impact on production and costs after the acquisition of an airline by a competitor in Brazil: a Cobb-Douglas function application*. Transportes, 27(1), 172-183.

Gudmundsson, S. V., Merkert, R., & Redondi, R. (2017). *Cost functions and determinants of unit cost effects in horizontal airline M&As*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 103, 444-454.

Guterres, M. X. & Correia, A. C. (2007). *Estimação de uma função de produção para a indústria do transporte aéreo nacional*. In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Anais. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Engenharia de Produção.

Hanlon, J. P. (2007). *Global airlines: competition in a transnational industry*. Routledge.

Ingold, A. (2003). *Airline Survival Kit: Breaking out of the Zero Profit Game.*

Johnston, A., & Ozment, J. (2013). *Economies of scale in the US airline industry*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 51, 95-108.

Luo, D. (2014). *The price effects of the Delta/Northwest airline merger*. Review of Industrial Organization, 44(1), 27-48.

Manuela Jr, W. S., & Rhoades, D. L. (2014). *Merger activity and short-run financial performance in the US airline industry*. Transportation Journal, 53(3), 345-375.

Peterman, C. A. (2014). *The Future of Airline Mergers After the US Airways and American Airlines Merger*. Journal of Air Law and Commerce., 79, 781.

Ryerson, M. S., & Kim, H. (2014). *The impact of airline mergers and hub reorganization on aviation fuel consumption*. Journal of cleaner production, 85, 395-407.

Shaw, S. L., & Ivy, R. L. (1994). *Airline mergers and their effect on network structure*. Journal of Transport Geography, 2(4), 234-246.

Shen, Y. (2017). *Market competition and market price: Evidence from United/Continental airline merger*. Economics of transportation, 10, 1-7.

Yan, J., Fu, X., Oum, T. H., & Wang, K. (2019). *Airline horizontal mergers and productivity: Empirical evidence from a quasi-natural experiment in China*. International Journal of Industrial Organization, 62, 358-376.

ANÁLISE CRÍTICA DAS OCORRÊNCIAS DE RISCO EM PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIO BRASILEIROS

Renata de Souza Sales, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: renatasales@det.ufc.br

PAPER ID: SIT169

RESUMO

A crescente procura pelo transporte aéreo tem gerado maior investimento em projetos e construções de aeródromos no Brasil. Conforme a aviação evoluiu, a segurança foi melhorada e a procura por viagens aéreas cresceu, pois o meio também se tornou mais acessível. No entanto, com maior número de operações, a probabilidade de ocorrência de acidentes e incidentes sofre interferência. Para que a segurança seja mantida, é necessário que haja, além de atendimento às normas e regulamentos, acompanhamento dos eventos de risco, com informações detalhadas sobre suas ocorrências e causas. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar criticamente três tipos de ocorrências de risco disponibilizadas pelo Painel SIPAER do Centro de Prevenção e Investigação de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Essa análise teve como principal objetivo avaliar a possibilidade de utilização dessas ocorrências como indicador de segurança operacional de pistas de pouso e decolagem. Os eventos analisados foram excursões em pista, perda de controle em solo e estouro de pneu, ocorridos entre 2012 e 2022. Por meio das análises, foi possível identificar o tipo de aeródromo em que os eventos mais ocorrem, além dos estados (UF) com maiores ocorrências e a forma como a gravidade desses eventos é distribuída. Percebeu-se uma concentração de ocorrências no estado de São Paulo. Os resultados indicaram que os eventos de excursão em pista e perda de controle em solo foram o que geraram maior número de acidentes e incidentes graves. Embora a gravidade dos eventos de estouro de pneu seja pequena, esse tipo de ocorrência apresentou número significativamente maior que as outras. Por fim, pode-se concluir que a utilização de dados de ocorrências de acidentes como indicador de segurança operacional é limitada, visto que os números são pequenos e impossibilitam análises estatísticas e computacionais mais robustas.

Keywords: Aeroportos, Acidentes, Indicador de Segurança.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) com os recursos financeiros para o desenvolvimento desta pesquisa.

1. INTRODUÇÃO

Embora o transporte aéreo seja um meio seguro de locomoção, isso não foi sempre uma realidade. Por esse motivo, as empresas aéreas, as autoridades de aviação civil e os operadores de aeródromos trabalham constantemente para manter esse ambiente e suas operações seguros. Uma maneira de analisar a segurança do transporte aéreo é por meio do número de ocorrências de acidentes e incidentes em um aeródromo. No entanto, segundo Cardoso et al. (2008) pelo fato de acidentes serem eventos raros, suas ocorrências, isoladamente, não podem ser utilizadas como indicador de segurança de um aeródromo, pois estatisticamente não há confiança nesse tipo de análise.

Considerando as definições apresentadas por ANAC (2022a), os acidentes aeronáuticos são ocorrências relacionadas com a operação de uma aeronave em que há consequências do tipo lesões graves ou morte, danos a aeronave ou desaparecimento do avião. Por sua vez, ANAC (2022b) descreve o incidente grave se como o evento que ocorre nas mesmas circunstâncias que um acidente, mas que não tem as mesmas consequências, e ANAC (2022c) caracteriza o incidente como todo evento que possa afetar a segurança de uma aeronave, mas que não chega a ter a dimensão de um acidente.

Tendo isso em vista, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a segurança da aviação brasileira por meio da análise descritiva dos eventos de acidentes, incidentes graves e incidentes ocorridos em aeródromos nos últimos 10 anos. Foram utilizados dados de três tipos de ocorrências: perda de controle em solo, excursão de pista e estouro de pneu.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Wilke *et al.* (2014) desenvolveram uma metodologia para analisar a qualidade de dados decorrentes da agregação de bancos de dados multi-organizacionais. Os autores observaram falhas constantes na segurança de dados decorrentes desse tipo de associação. Por meio do estudo, percebeu-se que a falta de sistemas de relatórios comuns era um obstáculo dentro da indústria e que, devido a isso, dados incomparáveis poderiam ser agregados, gerando incoerências nas bases de dados. Dessa forma, os autores sugeriram mudanças bruscas na coleta de informações importantes para a análise da segurança aeronáutica, de modo a criar padrões para os bancos de dados das diferentes fontes de informação.

No que diz respeito à segurança das operações de pouso e decolagem, as excursões em pistas constituem uma parcela significativa das ocorrências de risco da aviação em todas as classes de aeronaves. Esse tipo de evento tem diversos fatores contribuintes, que podem ser individuais ou combinados. Dessa forma, Distefano e Leonardi (2019) analisaram os fatores que podem contribuir para a ocorrências desses eventos, buscando correspondência entre eles. Os autores concluíram que excursões com perda total da aeronave são ocasionadas por condições climáticas e más condições do pavimento aeroportuário.

Para Wagner e Barker (2014), há cinco tipos de excursões em pista:

• Pouso realizado depois do fim da pista de pouso e decolagem;

• Saída pelo fim da pista durante a decolagem;

• Pouso realizado antes do início da pista de pouso e decolagem;

• Saída pela lateral da pista durante o pouso;

• Saída pela lateral da pista durante a decolagem.

Segundo Ayres Jr. *et al.* (2013), os tipos de excursões mais comuns são as de pouso com saída ao fim da pista de pouso e decolagem (35%) e pouso com saída lateral da pista (40%). Além disso, a maioria das ocorrências são identificadas como incidentes. Os autores ressaltaram que o tamanho da aeronave envolvida no evento e a presença de obstáculos podem ser agravantes para a ocorrência.

Os pneus de uma aeronave também compõem um fator que requer atenção, pois são de grande importância para o seu funcionamento e também podem provocar eventos de risco, como as explosões. Para evitar esse tipo de ocorrência é importante manter a pressão dos pneus adequada, além de manter a pista de pouso e decolagem em

condições adequadas de manutenção do pavimento. Segundo a FAA (2000, 2006) e a EASA (2013), os detritos provindos do estouro de um pneu podem causar danos à asa, cauda e ao trem de pouso da aeronave, o que pode resultar em ocorrências de risco à segurança.

Tendo isso em vista, Yao *et al*. (2018) desenvolveram um experimento sobre as respostas dinâmicas da proteção na cabine do trem de pouso principal sob a pressão de explosão dos pneus. Os autores verificaram que esse equipamento de proteção é efetivo na proteção das linhas hidráulicas e equipamentos contra danos causados pela por explosões de pneu.

No que diz respeito a perda de controle em solo, de acordo com a ANAC (2020), essa é uma ocorrência em que o piloto perde o controle da aeronave devido à falta de condições ou por ineficiência dos comandos. Esse evento pode ser resultado de condições inadequadas da pista, como defeitos, acúmulo de água ou de outro contaminante.

Sales *et al*. (2021) avaliaram a influência da remoção de borracha de uma pista de pouso e decolagem sobre as condições de aderência pneu-pavimento. Os autores concluíram que o procedimento era eficiente em manter os parâmetros de aderência (macrotextura e coeficiente de atrito) acima dos valores regulamentados pela autoridade da aviação brasileira, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

Além disso, Sales e Oliveira (2021) analisaram a aderência pneu-pavimento como indicador de segurança em pistas de pouso e decolagem. Os autores constataram a necessidade de ações quanto à manutenção dos pavimentos aeroportuários que seriam de importância na melhoria da aderência pneu-pavimento, e, portanto, no aumento da segurança das operações de pouso e decolagem.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Os dados das ocorrências de risco analisados neste capítulo foram obtidos por meio do Painel SIPAER do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). As informações são referentes aos últimos 10 anos, período disponibilizado pela plataforma, portanto, dizem respeito ao período de janeiro de 2012 a janeiro de 2022.

Foram coletadas as informações referentes a três tipos de ocorrências: excursões de pista, perda de controle em solo e estouro de pneu. A escolha por esses eventos justifica-se por serem aqueles que estão mais relacionados à condição de conservação dos pavimentos aeroportuários, em especial, as pistas de pouso e decolagem. Os arquivos obtidos por meio de download da plataforma foram planilhas de Excel. O download não incluiu as informações sobre os aeródromos onde ocorreram os eventos, informação que teve que ser inserida manualmente por digitação, por meio de consulta à própria plataforma, fator que limita o estudo pois pode levar a erros de consulta ou mesmo de digitação, o que restringe a confiabilidade e a análise de dados.

As análises foram realizadas por meio do software Microsoft Excel 2019, por ser de fácil acesso e conter as ferramentas necessárias para atingir o objetivo deste trabalho. Utilizou-se de tabelas e gráficos dinâmicos para melhor compreender os dados coletados. As informações avaliadas foram: aeródromo onde ocorreu o evento de risco, estado brasileiro (UF) da ocorrência, classificação (acidente, incidente e incidente grave).

4. RESULTADOS

A seguir, são descritos e discutidos os resultados obtidos por meio das análises realizadas neste trabalho. Eles foram divididos por tipo de avaliação realizada, para permitir uma melhor comparação entre os tipos de ocorrência.

4.1. Aeródromo

No total, foram contabilizadas 387 ocorrências de perda de controle em solo no período analisado. Destas, 284 ocorreram em 146 aeródromos diferentes, o que resulta em média 2 acidentes por aeródromo em um período de 10 anos. Dentre todos os eventos, 103 não tiveram os aeródromos de ocorrência informados, pois são aeródromos de aviação executiva, em que a identificação não é

armazenada. Essa falta de informação contabiliza 26,6% do total de dados.

A Figura 1 apresenta as ocorrências de perda de controle em solo por aeródromo. Foi aplicado um filtro de 10 maiores contagens. Devido à existência de aeródromos com mesmo número de ocorrências, pode-se observar a presença de 13 aeródromos na Figura 1. As duas maiores contagens desse evento são referentes ao Aeroporto Estadual Comandante Rolim Adolfo Amaro (SBJD), localizado em Jundiaí e o Aeroporto Estadual de Bragança Paulista (SBBP), ambos aeroportos regionais localizados no estado de São Paulo e com 11 ocorrências em cada aeródromo.

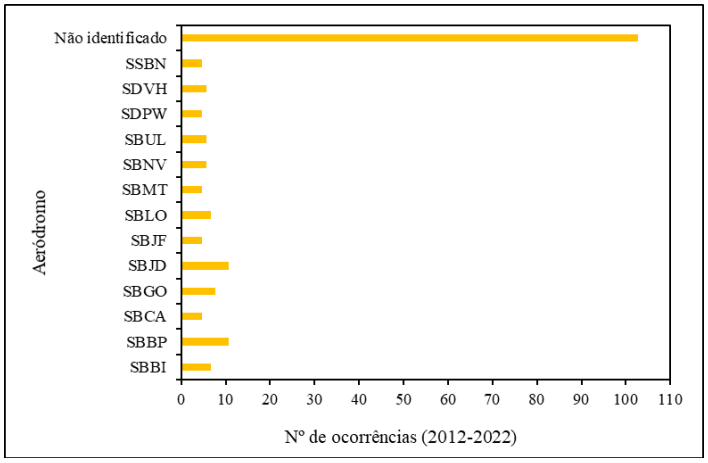


Figura 1 Número de ocorrências de perda de controle em solo por Aeródromo

O mesmo filtro foi aplicado novamente e a Figura 2 apresenta os resultados para as excursões de pista. Assim, foram contabilizadas 189 ocorrências de excursão de pista no período em análise. Dessas, 140 são referentes a 95 aeródromos diferentes; portanto, em média, 1,5 acidentes por aeródromo no período de 10 anos.

Foram contabilizados 49 eventos em que o aeródromo da ocorrência não foi identificado, uma proporção de 25,9%, próxima à referente às ocorrências de perda de controle em solo. O Aeroporto de Atibaia (SDTB), no estado de São Paulo, foi o que obteve maior número de ocorrências (7), seguido pelo Aeroporto Campo de Marte (SBMT), que também fica em São Paulo, com 5 ocorrências.

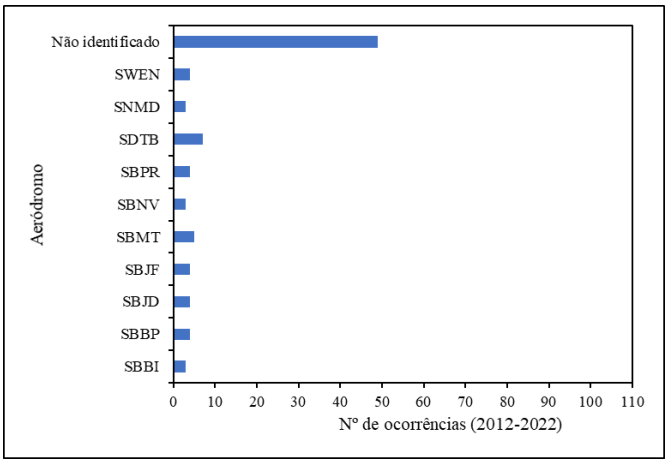


Figura 2 Número de ocorrências de excursão em pista por Aeródromo

No que diz respeito a estouro de pneu, constatou-se 581 ocorrências, destas 527 foram em 117 aeródromos diferentes. Um total de 54 não tiverem o aeródromo identificado, 9,3% do total de ocorrências, número menor que dos outros tipos analisados, mas ainda significante para análise dos dados em questão.

A Figura 3 contém os aeródromos com maior número de ocorrências de estouro de pneus. Por meio dela, é possível observar que ainda com a menor parcela de ocorrências não identificadas, esse tipo ainda é o com a maior contagem para esse evento. O Aeroporto Campo de Marte (SBMT), é, novamente, destacado com maior contagem de ocorrências (38), desta vez seguido pelo Aeroporto de Belo Horizonte/Pampulha - Carlos Drummond de Andrade (SBBH), em Minas Gerais, com 26 ocorrências.

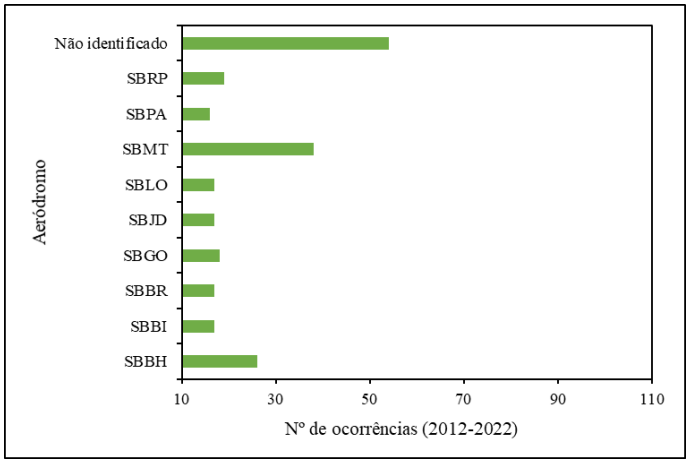


Figura 3 Número de ocorrências de estouro de pneu por aeródromo

A Figura 4 apresenta um resumo dos 10 aeródromos com maior número de ocorrências no total. Os cinco aeródromos com maior número são, em ordem crescente: Aeroporto Campo de Marte (SBMT), Aeroporto Estadual Comandante Rolim Adolfo Amaro (SBJD), Aeroporto de Belo Horizonte/Pampulha - Carlos Drummond de Andrade (SBBH), Aeroporto de Goiânia (SBGO) e Aeroporto do Bacacheri (SBBI). Os dois primeiros são localizados no estado de São Paulo, enquanto o SBBH fica em Minas Gerais, SBGO em Goiás e SBBI no Paraná.

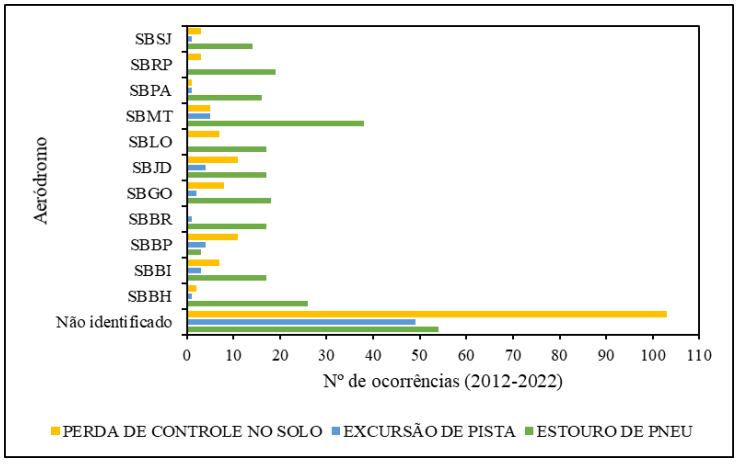


Figura 4 Resumo das ocorrências por aeródromo

4.2. Classificação das ocorrências

A Figura 5 apresenta a classificação das ocorrências de perda de controle em solo. Pode-se observar que, para esse tipo de evento, cerca de metade foram declarados como acidentes, ou seja, tiveram maior gravidade. Além disso, uma parcela de 30% foi notificada como incidente grave. A alta proporção de gravidade indica que a perda de controle em solo é um evento que deve se ter mais atenção, por parte da autoridade de aviação civil e operadores de aeródromos, visto que apenas 20% foram identificados como de menor gravidade.

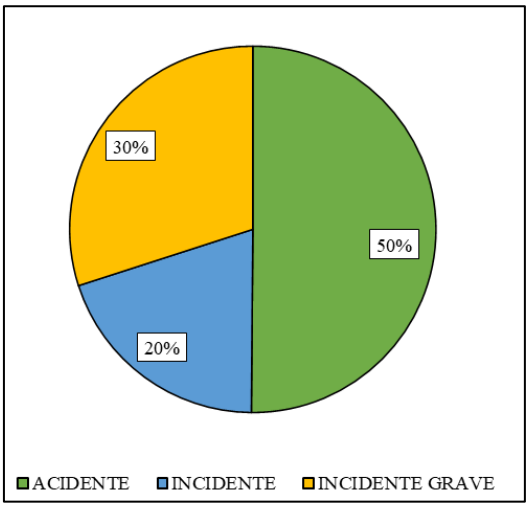


Figura 5 Classificação das ocorrências de perda de controle em solo

A Figura 6 apresenta a classificação das ocorrências de excursão de pista. Por meio dela, é possível notar que, novamente, houve metade dos registros classificados como acidente (51%), porém, um número maior classificado como incidente grave. Desta vez, cerca de 10% das ocorrências foram classificadas apenas como incidente. Isso demonstra que as ocorrências de excursão em pista costumam ser mais graves.

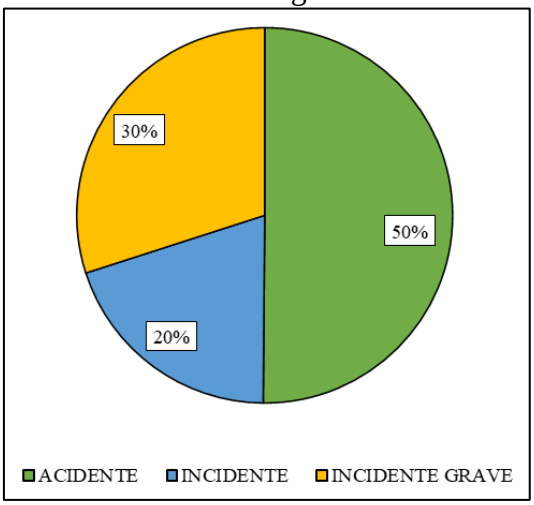


Figura 6 Classificação das ocorrências de excursão de pista entre 2012 e 2022

Apresenta-se, por meio da Figura 7, a classificação das ocorrências de estouro de pneu. Pode-se verificar uma menor gravidade para esse tipo de ocorrência, visto que 97% foi denominada como incidente e 1% como acidente.

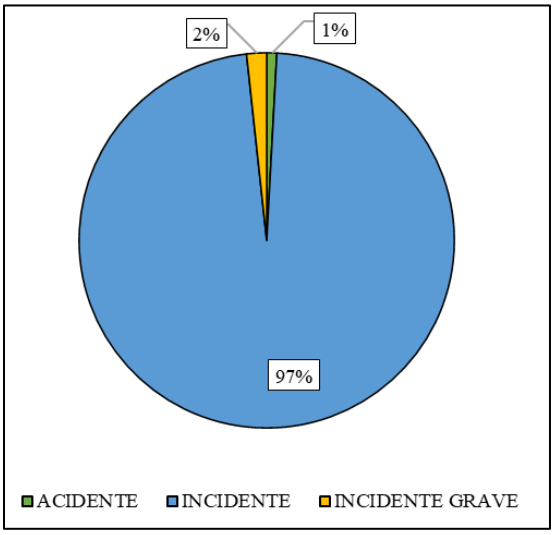


Figura 7 Classificação das ocorrências de estouro de pneu entre 2012 e 2022

4.3. Estado (UF)

A Figura 8 apresenta um resumo das ocorrências por estado brasileiro (UF) onde os eventos ocorrerem. Por meio dela, pode-se observar que São Paulo concentra grande parte das ocorrências (27% para perda de controle em solo, 25% para excursão e 28% para estouro de pneu), o que pode ser devido à concentração de aeródromos existente no estado. Isso pois em São Paulo, encontram-se dois dos aeroportos mais movimentados do Brasil: o Aeroporto de Guarulhos com 159.652 operações em 2020 e o Aeroporto de Congonhas com 104.022 (DECEA 2020). Além disso, pode-se perceber que alguns estados contabilizaram poucas ocorrências, bem como apresentaram eventos de apenas um tipo, o que também pode-se atribuir ao fato de terem menor número de aeródromos.

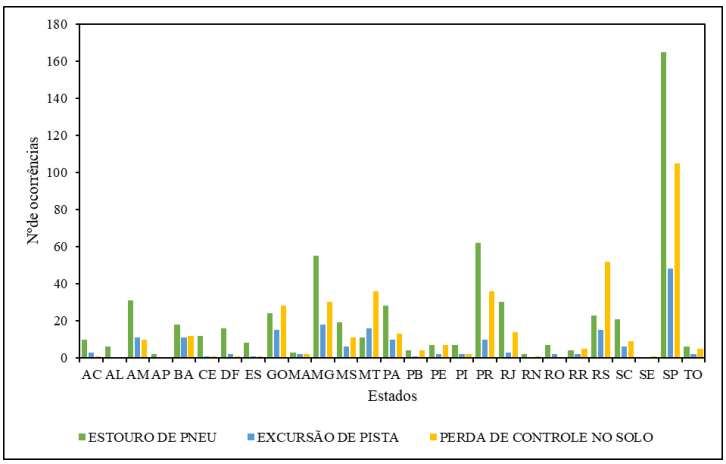


Figura 8: Nº de ocorrências de perda de controle em solo por UF

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar fatores relacionados ao pavimento aeroportuário que podem influenciar a segurança das operações de pouso e decolagem, além da usabilidade das ocorrências como indicador de segurança. Constatou-se que os eventos de excursão em pista e perda de controle em solo foram o que geraram maior número de acidentes e incidentes graves. Ademais, embora a gravidade dos eventos de estouro de pneu seja pequena, esse tipo de ocorrência apresentou número significativamente maior que as outras.

Além disso, constatou-se que o estado com maior número de acidentes e incidentes é o de São Paulo. Pode-se concluir que esse fato é devido a região do estado concentrar movimentação financeira, o que gera maior demanda por voos.

Pode-se concluir que as ocorrências analisadas se concentram em aeroportos de menor porte, em sua maioria de aviação geral. Isso demonstra que existe um maior controle sobre a segurança nas operações em aeródromos mais movimentados. De acordo com a lógica da estatística, existe maior possibilidade de ocorrência de acidentes com um número maior de operações. O fato de aeroportos de pequena movimentação se destacarem em número de ocorrências de risco indica falhas na segurança das operações desses aeródromos, que necessitam receber maior atenção acerca dessas questões.

A análise abordada foi consideravelmente dificultada devido a ausência de informações acerca de aeródromos de aviação executiva. Isso pois, em média 20,6% dos eventos não tiverem identificação do aeródromo de ocorrência.

Dessa forma, destaca-se que para melhor análise das questões de segurança em aeródromos brasileiros, é indispensável que sejam disponibilizados dados mais detalhados. Devido a pouca quantidade e a limitação das informações coletadas acerca das ocorrências de risco, pode-se concluir que não é possível o desenvolvimento de um indicador de segurança por meio do uso dos dados divulgados pela plataforma do SIPAER. É preciso que haja um acompanhamento mais rígido das ocorrências de risco, para que as falhas sejam identificadas, e, dessa forma, suas causas sejam investigadas e neutralizadas, garantindo maior segurança operacional para a infraestrutura aeroportuária brasileira.

Referências

ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil). (2020). Cartilha de Gerenciamento da Segurança para Pequenos Operadores de Aeródromos. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/biblioteca-safety/CartilhaGerenciamento.pdf. Acesso em 24 de abril de 2022.

ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil). (2022a). Acidente Aeronáutico - ANACPÉDIA. Disponível em: https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr53.htm. Acesso em: 17 abr. 2022.

ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil). (2022b). Incidente Aeronáutico - ANACPÉDIA. Disponível em: https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr287.htm. Acesso em: 17 abr. 2022.

ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil). (2022c). Incidente Aeronáutico Grave - ANACPÉDIA. Disponível em: https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr2589.htm. Acesso em: 17 abr. 2022.

Ayres Jr, M., Shirazi, H., Carvalho, R., Hall, J., Speir, R., Arambula, E., David, R., Gadzinski, J., Caves, R., Wong, D. & Pitfield, D. (2013). Modelling the location and consequences of aircraft accidents. Safety Science, 51(1), 178-186.

Cardoso, S. H., Maurino, D., & Fernandez, J. (2008). Methodology to estimate individual and overall performance indicators for airport safety management systems Transportation Research Board (No. 08-0197).

Distefano, N., & Leonardi, S. (2019). Aircraft runway excursion features: a multiple correspondence analysis. Aircraft Engineering and Aerospace Technology.

EASA (European Aviation Safety Agency). (2013). Amending decision on certification specifications for large aeroplanes. CS-25, Cologne, Germany.

FAA (Federal Aviation Administration). (2000). Airworthiness standards, transport category aeroplane. 14 CFR, Part 25, Washington, DC.

FAA (Federal Aviation Administration). (2006). Aircraft tires. TSO-C62, Washington, DC

Sales, R. D. S. & Oliveira, F. H. L. D. (2021). Análise da Aderência Pneu-Pavimento como Indicador de Segurança Operacional em Pistas de Pouso e Decolagem. Anais do 46ª Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, DF.

Sales, R. D. S., Oliveira, F. H. L. D., & Prado, L. D. A. (2021). Performance of tire-asphalt pavement adherence according to rubber removal on runways. International Journal of Pavement Engineering, 1-11.

Wagner, D. C., & Barker, K. (2014). Statistical methods for modeling the risk of runway excursions. Journal of Risk Research, 17(7), 885-901.

Wilke, S., Majumdar, A., & Ochieng, W. Y. (2014). A framework for assessing the quality of aviation safety databases. Safety Science, 63, 133-145.

Yao, S., Yue, Z., Zhang, J., Geng, X., Wang, P., & Yang, H. (2018). Safety assessment of protection cover under the blast pressure of aircraft tire blowout. Journal of Aerospace Engineering, 31(2), 04017103.

NETLOGO COMO FERRAMENTA EM SIMULAÇÕES PARA O URBAN AIR MOBILITY (UAM)

Felipe Desiglo Ferrare, Paulo Sérgio Cugnasca
Universidade de São Paulo (USP), Escola Politécnica (Poli), Departamento de Engenharia de Computação

*** Corresponding author e-mail address**: felipe.ferrare@usp.br

PAPER ID: SIT227

ABSTRACT

O uso de ferramentas computacionais auxilia o desenvolvimento de novos projetos e tecnologias. Uma importante forma de uso de tecnologia aplicada ao desenvolvimento de novos sistemas é o uso de simulações, seja para simular a construção de um sistema que está sendo concebido e seus componentes, seja para simular o funcionamento de novos sistemas e os impactos de mudanças neles inseridas. Algumas ferramentas utilizadas para simulação de sistemas são os Sistemas Multiagentes (SMA), a partir dos quais é possível simular o comportamento de múltiplos agentes inteligentes e independentes entre si, interagindo em um mesmo ambiente. Uma ferramenta gratuita, eficaz e de fácil utilização para esse fim é conhecida como linguagem Netlogo. Neste artigo apresenta-se as possibilidades do uso de SMA e a capacidade do Netlogo no auxílio ao desenvolvimento de novos sistemas aeronáuticos. Com essa ferramenta é possível simular o *Air Traffic Management* (ATM) e validar mudanças no gerenciamento de tráfego, bem como testar diversos tipos de aeronaves em ambientes e condições diferentes, como mudanças climáticas e diferentes tipos de aeronaves. Como exemplo, explora-se neste trabalho a simulação do espaço aéreo, no contexto do *Urban Air Mobility* (UAM), uma nova modalidade de gerenciamento de tráfego de veículos aéreos, incluindo Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) voando em baixa altitude, integrada ao ATM tradicional. Dentre esses veículos encontram-se os VTOLs (*Vertical Take-Off and Landing*) autônomos. No ambiente de UAM foi utilizado o Netlogo para simular esse ambiente e, assim, obter-se dados para uso de validação das hipóteses preconizadas. Com esse trabalho pretende-se mostrar as capacidades da ferramenta Netlogo que pode ser utilizada em outros trabalhos que visem explorar as tecnologias e os potenciais de sistemas similares no UAM, bem como em outras aplicações na área aeronáutica.

Keywords: Netlogo, Simulação, Veículos Aéreos Não Tripulados, *Urban Air Mobility*.

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas tecnologias tem-se criado um grande avanço em diversas áreas nos últimos anos, e a aviação em geral não é uma exceção. Houve um grande avanço na tecnologia dos VTOLs (*Vertical Take-Off and Landing*), veículos de decolagem e pouso vertical, ou na sua versão elétrica, os e-VTOLs (*electric*-VTOL), dentre os quais destacam-se, principalmente, os veículos autônomos não tripulados, conhecidos popularmente como *drones*, ou também conhecidos como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

Esses veículos têm colocado uma grande expectativa nas mais diversas áreas, desde o transporte de passageiros (Maget, 2020), entregas (Reiche, 2019), até inspeções técnicas (Montambault, 2010) e segurança pública (Ashish, 2020).

Mas isso também cria a questão de como esses veículos seriam controlados e poderiam dividir o espaço aéreo com outros tipos de aeronaves, como o clima afetaria esse ambiente (Reiche, 2019), além dos impactos disso no trânsito e no ambiente urbano que já existem atualmente (Maget, 2020).

Além disso, tem-se que analisar e criar regras para o convívio desses veículos com outros tipos de tráfego, de maneira segura, considerando as regras e os espaços possíveis de navegação, e para manter um nível de segurança equivalente a outros sistemas de transporte (FAA, 2020).

Assim, apresenta-se neste trabalho uma das propostas feitas para a utilização dos VTOLs em um ambiente urbano, o chamado UAM (*Urban Air Mobility*) e a linguagem de programação de simulação de agentes denominada Netlogo. Utilizando um levantamento baseado na literatura consultada foi desenvolvido um modelo multiagentes para o UAM, no qual pode-se efetuar diversas simulações para validar o modelo criado, além de se gerar dados sobre o seu possível uso, avaliando-se, como resultado, o desempenho global do UAM.

Esse trabalho pretende mostrar as possibilidades da utilização da simulação para os sistemas aeronáuticos e como, principalmente, o uso de modelos multiagentes pode gerar benefícios para a construção e melhoria de sistemas aéreos sendo desenvolvidos, como o UAM.

Ao final, são mostrados alguns resultados gerados pelo aplicativo desenvolvido e é efetuada uma análise de maneira a demonstrar os resultados obtidos, além de apresentar as possibilidades de aplicações derivadas.

2. UAM

No contexto deste trabalho, tem-se então que pensar em um novo paradigma para se trabalhar o espaço aéreo com o uso dos VANTs, denominado UAM (*Urban Air Mobility*) (FAA, 2020).

Pode-se, a partir disso, pensar em uma alternativa para aprimorar o atual ATM (*Air Traffic Management*) ou o sistema de controle tradicional de tráfego aéreo e, assim, incluir os VANTs nesse ambiente.

Desta forma, surge esse novo conceito de ATM urbano, o UAM, que une o planejamento urbano da cidade com o uso e planejamento dos sistemas de transporte já existentes nos grandes centros urbanos, de maneira inteligente (Maget, 2020).

Para isso estão sendo propostos e analisados diversos tipos de divisões do espaço aéreo, com a criação de regras para pelo menos manter os atuais níveis de confiabilidade desse tipo de transporte, bem como locais de pouso e decolagem dessas aeronaves, e como elas iriam navegar no ambiente urbano (FAA, 2020).

Essas abordagens podem colaborar na redução de congestionamentos nas grandes cidades, além de aumentar a capacidade de movimentação das pessoas nos já congestionados centros urbanos (Postorino, 2020).

Apesar disso é necessário se ficar atento aos diversos problemas e desafios incluídos nessa nova abordagem, que vão desde a criação de regras e divisão do espaço, as vantagens e as desvantagens de sua utilização e a sua integração com o sistema de trafego já existente (FAA, 2020) (Postorino, 2020).

Diversos órgãos, como a FAA e a NASA, estão, atualmente, buscando analisar formas de se organizar, regular e controlar esse novo espaço aéreo, incluindo níveis de automação e

capacidade de integração com os humanos e com sistemas totalmente automatizados (Vempati, 2021).

Fatores como o clima e a capacidade do espaço aéreo, a segurança, os custos e outros diversos fatores são de extrema relevância e existe uma necessidade cada vez maior da importância da pesquisa nessa área para mapear e organizar todos esses fatores (Reiche, 2019).

A partir dessa perspectiva pode-se observar que os diversos cenários resultantes dessa nova abordagem resultam em uma crescente complexidade, sendo necessário a validação deles por meios de simulação computacional. Surge, então, uma grande necessidade de se definir as necessidades e os impactos dessas mudanças no UAM, e de se executar simulações, por exemplo, utilizando sistemas multiagentes (Postorino, 2020).

3. NETLOGO

Netlogo é uma linguagem de programação multiagentes baseada na linguagem Logo e criada por Wilensky (1999). Essa linguagem é baseada em agentes e foi criada, inicialmente, na década de 1970, com foco no ensino de crianças (ou jovens). Por isso, foi construída com o foco de ser simples de ser aprendida. Ela também foi criada com base no LISP, uma linguagem bastante popular na academia e na área de inteligência artificial na época (Wilensky, 2005).

A linguagem Logo é uma linguagem baseada em agentes, permitindo que o programador construa um código com foco em um agente. Inicialmente, na época de sua criação, ela foi planejada como um robô que navegaria em um ambiente físico no centro de uma sala e seria capaz de executar desenhos no chão. Acabou evoluindo junto com a tecnologia para se ter várias implementações virtuais, ganhando outras aplicações (Wilensky, 2005).

Assim, no final da década de 1990, Wilensky (1999) implementou a primeira versão do Netlogo, uma versão da linguagem Logo com diversas extensões, apesar de ainda preservar muitos componentes do Logo original, para ser facilmente aprendida e usada (Wilensky, 2005).

A linguagem Netlogo conta com a capacidade de se efetuar uma modelagem multiagente. Ou seja, diferentemente da linguagem Logo, que é limitada a um agente, a linguagem Netlogo permite que se modele o comportamento de diversos agentes ao mesmo tempo, interagindo e trocando informações entre eles e deles com o ambiente (Wilensky, 2005).

Adicionalmente, a linguagem Netlogo possui, além da capacidade de usar ambientes 2D (duas dimensões), a possibilidade de criação de simulações em 3D (três dimensões), tornando mais poderosa essa ferramenta, e dando capacidade para a simulação de um ambiente utilizado aeronaves em múltiplas altitudes, do mais simples exemplo até o mais complexo (Wilensky, 2005).

Assim, o Netlogo tem grande capacidade de simulação, podendo abranger simulações mais complexas que o Logo, sendo utilizado desde aplicações na Física e em ciências sociais, até em outras aplicações em diversos campos científicos (Wilensky, 2005).

O Netlogo, além disso, possui um código fonte aberto e uma ampla gama de modelos de exemplos (Wilensky, 2005). Sua biblioteca inclui, inclusive, modelos aeronáuticos, como um modelo de exemplo de pouso de uma aeronave de asa fixa em um aeroporto (Wilensky, 2011).

Pode-se observar que o Netlogo se mostra como uma alternativa interessante no desenvolvimento de modelos com aplicação na aérea aeronáutica, considerando o seu uso no ATM ou no UAM.

4. SIMULAÇÃO

Foi construído um modelo no qual foram propostas algumas situações descritas em detalhes em Ferrare (2021), cujos principais pontos são apresentados a seguir. Ainda, em Ferrare (2021b) foram desenvolvidos alguns cenários utilizados para validar o modelo, mostrando-se os principais resultados obtidos.

O modelo desenvolvido possui um ambiente do espaço aéreo na forma de um paralelepípedo, de tamanho variável. Esse

ambiente é divido em quadrículas de 0,5 milhas náuticas (NM) de lados por 200 pés (ft) de altura. Assume-se que uma aeronave pode navegar em qualquer direção dentro desse espaço ocupado por uma quadrícula, sendo considerado uma situação de quase-colisão se duas aeronaves adentrarem a mesma quadrícula.

A partir disso, simula-se o espaço entre 1.000 ft e 3.200 ft de altitude, adotando-se uma divisão alternada entre os diferentes níveis de altitudes de navegação, de acordo com o ângulo da proa das aeronaves, dividindo em dois grupos de altitudes diferentes. Na Figura 1 pode-se observar um esquema conforme proposto, onde tem-se o ATM (ou tráfego tradicional acima de 3.200 ft) e o UAM (entre 1.000 ft e 3.200 ft). No espaço abaixo de 1.000 ft tem-se a área para se efetuar pousos e decolagens. A maior parte das estruturas de prédios e obstáculos vão ficar nessa área.

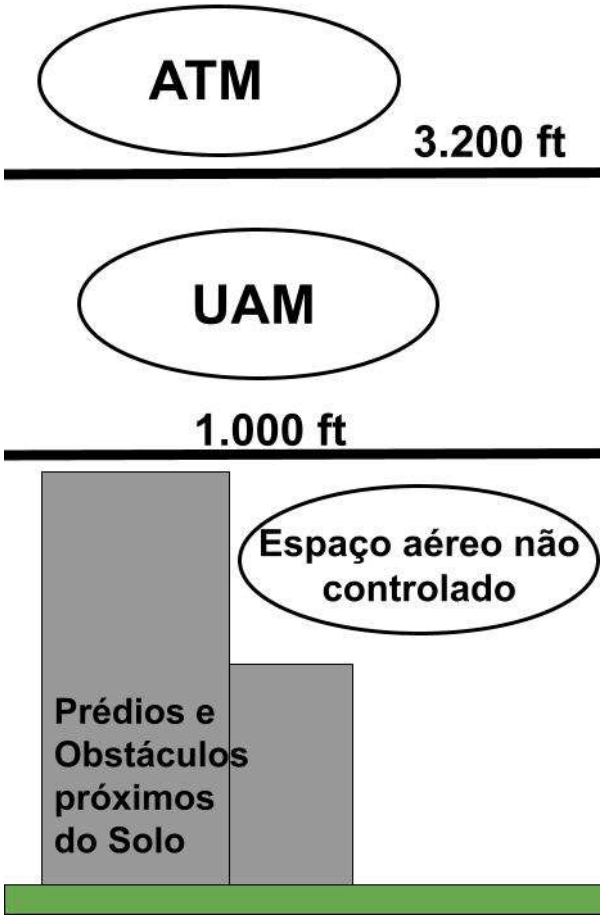


Figura 1: Ambiente Simulado do UAM. Fonte: Autor.

O espaço abaixo de 1.000 ft é considerado espaço para pousos e decolagens e não está incluído na simulação. Nesta concepção, as aeronaves podem subir em qualquer ponto do ambiente, em uma trajetória na forma de uma espiral, dentro de sua quadrícula, até entrar nas altitudes sendo simuladas, a partir da qual passa a poder se locomover horizontalmente.

Pode-se observar na Tabela 1 um detalhamento do modelo desenvolvido utilizando uma versão resumida do protocolo de descrição de modelos multiagentes, conforme apresentado por Grimm (2020). Na primeira linha da tabela (**Inicialização**) aparecem as configurações com as principais entidades e variáveis do modelo, além dos parâmetros que podem ser colocados antes do início da execução. Na segunda linha da tabela (**Modelo**) são listadas as descrições sobre o fluxo de execução do modelo. Já na terceira e última linha (**Análise**) são mostrados os valores colocados no resultado da execução de uma simulação.

Um ponto importante do modelo é que as aeronaves são capazes de se comunicar com o ambiente durante o processo de subida e, assim, o ambiente pode deixar o espaço das quadrículas que serão utilizadas na subida "travadas" ou "bloqueadas", de maneira que outras aeronaves devam esperar ou desviar dessas quadrículas para prosseguir com sua trajetória. Ainda, a aeronave, à medida que se move, vai liberando o espaço das quadrículas, de acordo com o seu movimento.

As aeronaves também tentam executar o caminho mais retilíneo possível até o seu destino final, podendo efetuar, quando necessários, desvios pela direita ou por baixo.

O modelo permite a criação de diferentes cenários utilizando diferentes cargas de entradas e tipos aeronaves, diferentes velocidades máximas das aeronaves além de separação de segurança que essas aeronaves devem manter.

Tabela 1: Diagrama de Modelo

Inicialização	**Entidade:** **Nome: quadrículas (patches)** **Variáveis da Entidade:** - Clima (caso tenha nuvem na quadrícula) - Célula bloqueada **Entidade**: **Nome: Aeronaves (VTOLs)** **Variáveis da Entidade:** - Coordenadas destino - Distância percorrida - Tempo percorrido **Parâmetros de Entrada**: - Tamanho do mundo - Velocidade vertical (1 e 2) - Velocidade horizontal (1 e 2) - Número de CBs (1 e 2) - Quantidade de VTOLs de cada tipo no intervalo de tempo (1 e 2) - Intervalo de tempo em que novas aeronaves são incluídas. - Separação estipulada vertical - Separação estipulada horizontal - Tipo de cenário
Modelo	1- Aeronave é alocada a uma altitude (dependendo da direção). 2- Aeronave bloqueia as células até a altitude designada e sobe verticalmente até a sua altitude. 3- Aeronave ajusta a sua proa até a direção que deseja seguir. 4- Aeronave anda seguindo para frente na velocidade escolhida. 5- Em caso de nuvens ou outras aeronaves no mesmo nível da aeronave, ela tenta manter a distância de espaçamento, reduzindo a velocidade. 6- Em caso de necessidade, aeronave pode parar no ar e esperar, ou então fazer um desvio pela direita ou por baixo, se possível. 7- Quando a aeronave estiver em cima do seu destino, tenta bloquear as células abaixo dela e então vai descendo, verticalmente, desbloqueando as células.
Análise	- Número de aeronaves que conseguiram concluir a viagem até o destino. - Média de tempo e distância percorrida. - Números de violações de distância e colisões.

Pode-se observar na Figura 2 um exemplo de como se parece a visualização gráfica da execução do modelo no Netlogo.

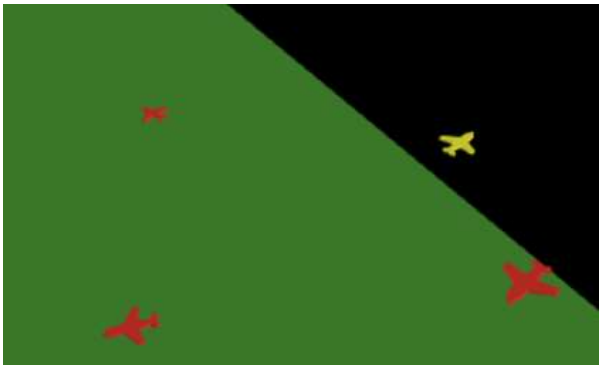


Figura 2: Agentes VTOLs no ambiente de simulação do Netlogo. Fonte: Autor.

Na Figura 3 pode-se ver os diferentes tipos de agentes, denominados VTOL-1 e VTOL-2 (mostrados em cores diferentes), deslocando-se em um ambiente 3D simulado, seguindo em diferentes direções.

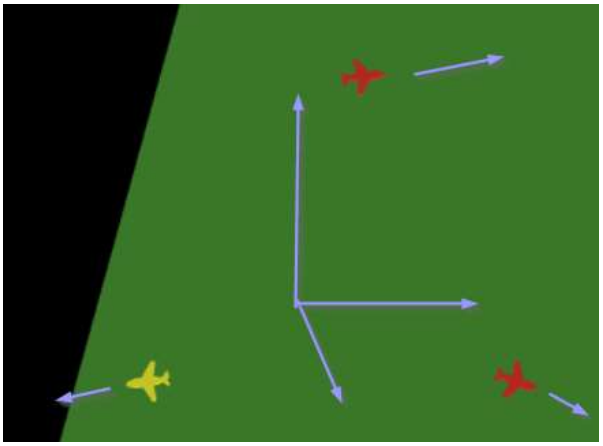


Figura 3: Agentes em ambiente em 3D. Fonte: Autor.

Foram considerados dois tipos de agentes para permitir a modelagem de dois tipos de aeronaves com capacidades de velocidade diferentes, operando na mesma região do espaço aéreo, além de diferentes números de aeronaves entrando no ambiente dentro de um intervalo de tempo. O modelo elaborado é flexível para permitir a ampliação do escopo para se ter outros tipos de aeronaves e se considerar outras variáveis de simulação.

Na Figura 4 observa-se o ambiente em 3D do espaço considerado, com as aeronaves e com obstáculos brancos representando, no

caso, nuvens ou formações climáticas das quais a aeronave teria que desviar, chamadas aqui de CB (cumulonimbus).

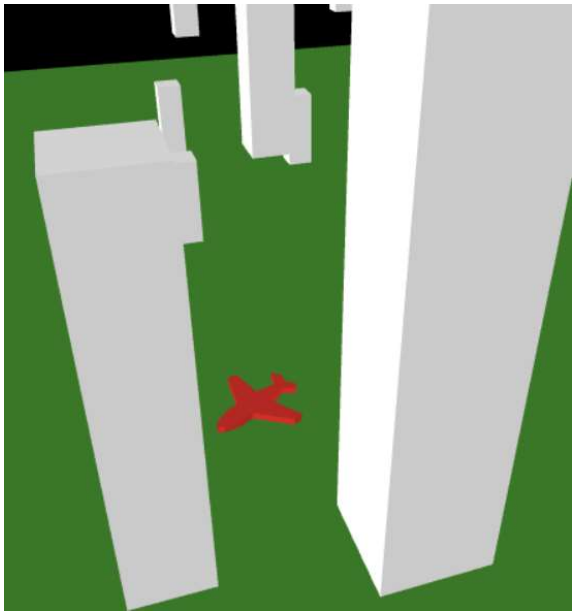


Figura 4: Agentes (VTOL) e CB. Fonte: Autor.

No modelo desenvolvido temos dois tipos de formações climáticas, no caso aqui apresentaremos 1 tipo dessas formações o CB-1 que são formações que ocupam de 2-4 quadriculas de maneira vertical. O modelo permite definir um parâmetro numérico N e são criadas N formações em lugares diferentes de maneira estocástica a cada simulação. Podendo então o ambiente possuir mais ou menos formações e formações de tipos diferentes, podendo assim simular um clima totalmente limpo ou um clima ruim.

5. RESULTADOS

Com base nas simulações realizadas, chega-se a alguns cenários que são situações com diferentes parâmetros de entrada, sendo que cada situação pode ser executada múltiplas vezes, gerando resultados diferentes, pois em cada execução são gerados VANTs e rotas diferentes peudo-aleatoriamente ou de maneira estocástica. Com esse critério de geração de várias execuções pode-se avaliar tendências dentro das execuções com cada parâmetro e não se fica preso em dados não reproduzíveis de apenas uma execução estocástica (Thiele, 2014).

Para este trabalho foram geradas algumas execuções do modelo, sendo mostrados aqui as médias, os desvio-padrão, os valores máximos e mínimos, e os quartis após a execução do mesmo cenário 100 vezes. Dessa forma, tem-se 100 execuções do modelo por cenário considerado.

Nesses cenários considerou-se um ambiente de 30 NH x 30 NH, e executou-se o equivalente a 600 minutos por cada execução.

O primeiro cenário apresenta 3 VTOLs do tipo 1 (VTOL-1) e 1 VTOL do tipo 2 (VTOL-2), que são adicionados ao ambiente a cada 3 minutos. Além disso, os VTOLs-1 têm velocidades máximas de 200ft/min (na vertical) e 30KT (na horizontal), enquanto que os VTOLs-2 possuem, respectivamente, velocidades máximas de 200ft/min e 30KT.

O segundo cenário consiste na introdução de formações de nuvens climáticas (CB) – 50 formações, utilizando os mesmos parâmetros do primeiro cenário.

O terceiro cenário contém 9 VTOLs do tipo 1 e 1 VTOL do tipo 2, que são adicionados ao ambiente a cada 3 minutos. Além disso, o VTOL-1 tem velocidades máximas de 800ft/min e 90KT, enquanto que o VTOL-2 tem velocidades máximas de 400ft/min e 60KT, respectivamente.

Os dados resultantes foram compilados e apresentados em duas tabelas para cada cenário. Na primeira tabela apresentam-se três variáveis: o número de aeronaves que concluíram a rota (*Concluintes*), o número de violações de separação entre aeronaves, que representa o número absoluto de aeronaves que violaram a distância mínima (*Separação*) e o número de aeronaves que ficaram em espera por mais de 10 minutos na mesma posição (*Delay*), aguardando uma oportunidade para se locomover ou pousar.

Na segunda tabela são mostradas a distância média horizontal percorrida pela aeronave (*Distância*) e o tempo total médio da rota de cada aeronave, incluindo as operações de subida e de descida (*Tempo*).

Na Tabela 2 e na Tabela 3 encontram-se os resultados compilados do primeiro cenário. Na Tabela 4 e na Tabela 5 encontram-se os resultados compilados do segundo cenário.

Tabela 2: Cenário 1 - Resultados (1)

	Concluintes	*Separação*	*Delay*
Média	291,51	25,52	0,89
Desvio Padrão	15,89	116,38	1,56
Máximo	325	955	8
Mínimo	232	0	0
1ºQuartil	282	3	0
3ºQuartil	302	10,25	2

Tabela 3: Cenário 1 - Resultados (2)

	Distância	*Tempo*
Média	2590,79	15,83
Desvio Padrão	72,24	0,52
Máximo	2765,9	17,21
Mínimo	2418,6	14,56
1ºQuartil	2543,35	15,515
3ºQuartil	2642,22	16,1325

Tabela 4: Cenário 2 - Resultados (1)

	Concluintes	*Separação*	*Delay*
Média	284,9	37,79	3,82
Desvio Padrão	15,51	128,83	2,38
Máximo	314	688	10
Mínimo	243	0	0
1ºQuartil	276,5	2	3,5
3ºQuartil	295,25	10	5

Tabela 5: Cenário 2 - Resultados (2)

	Distância	*Tempo*
Média	2578,89	15,84
Desvio Padrão	87,268	0,64
Máximo	2771,43	17,98
Mínimo	2377,54	14,7
1ºQuartil	2507,87	15,36
3ºQuartil	2646,89	16,23

Na Tabela 6 e na Tabela 7 encontram-se os resultados compilados do terceiro cenário.

Tabela 6: Cenário 3 - Resultados (1)

	Concluintes	*Separação*	*Delay*
Média	735,26	29,59	3,14
Desvio Padrão	37,53	161,26	3,96
Máximo	863	1000	17
Mínimo	638	0	0
1ºQuartil	710,5	0	0
3ºQuartil	760,25	5	5

Tabela 7: Cenário 3 - Resultados (2)

	Distância	*Tempo*
Média	2595,59	6,76
Desvio Padrão	50,71	0,26
Máximo	2726,3	7,86
Mínimo	2461,13	6,27
1ºQuartil	2559,043	6,57
3ºQuartil	2629,1	6,90

Pode-se observar que, devido à natureza estocástica das simulações realizadas, há uma certa variabilidade nos resultados, considerando os mesmos parâmetros de entrada. Por essa razão, foram feitas múltiplas execuções para cada cenário para se obter as "tendências" existentes associadas aos parâmetros.

Comparando-se o cenário 1 com o cenário 2, apesar de a distância média percorrida pelas aeronaves ter sido ligeiramente menor, o tempo gasto foi ligeiramente maior devido às formações climáticas reduzirem a capacidade do espaço aéreo. Apesar de o número de conclusões médio não ser tão menor, sua distribuição de resultados permaneceu semelhante entre violações de distância e conclusões, já que o espaço aéreo se encontra, apesar das nuvens, em uma situação estável de sua capacidade. Apesar disso, houve um grande aumento de atrasos (*delay*) devido a esperas causadas por mudanças de rotas e desvios gerados pelos CBs, assim não houve um grande impedimento para as aeronaves concluírem, apesar de elas demorarem mais tempo, por causa de ficarem paradas esperando.

Comparando o cenário 1 com o cenário 3, pode-se observar que no cenário 3 há um aumento no número de conclusões devido a mais agentes estarem entrando no ambiente. Apesar de a distância média ser muito próxima, o tempo de conclusão foi reduzido.

Apesar de o tempo de conclusão de rota pelos VTOLs ter sido reduzido, quando se compara o cenário 2 com o cenário 3, observa-se que o número de atrasos (*delay*) foi muito maior no cenário com mais velocidade do que no cenário com CBs, já que apesar de se aumentar a velocidade máxima das aeronaves, muitas vezes elas acabam paradas em situação de espera, o que mostra a importância em, por exemplo, reduzir a velocidade máxima das aeronaves dentro de uma área específica, o que pode aumentar a segurança e a capacidade do ambiente, além de reduzir o custo operacional.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos por este trabalho pode-se observar a capacidade de uso de sistemas multiagentes e simulações computacionais em aplicações de construção e de validação cenários em por exemplo um ambiente do UAM.

O UAM tem diversas capacidades e diferentes níveis de aplicações. Com isso pôde-se avaliar como a utilização de agentes pode criar diferentes ambientes, e como o ajuste de variáveis e a configuração de diferentes tipos de capacidade, clima, número de aeronaves podem influenciar na obtenção de resultados, como a capacidade do espaço aéreo e o número de conclusões de voos.

Desta forma, neste trabalho foi possível analisar por exemplo como um sistema complexo como o UAM se comportaria em diferentes situações de estresse do espaço aéreo destinado a VTOLs, e gerar dados que podem auxiliar a se entender como esses parâmetros se influenciam mutuamente.

7. REFERÊNCIAS

Ashish, M.; A. Muraleedharan, S. CM, R. R. Bhavani and N. Akshay (2020). "Autonomous Payload Delivery using Hybrid VTOL UAVs for Community Emergency Response," *2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198490.

FAA (2020). NextGen: Concept of Operations V1.0, Urban Air Mobility. https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf.

Ferrare, Felipe Desiglo; Moreira Baum, Derick; De Almeida Junior, Jorge Rady; Camargo Júnior, João Batista; Cugnasca, Paulo Sérgio (2021). Scenarios for the Use of eVTOLs Using Multiagent SystemsWith Netlogo:Comparison Of Parameters And The Impact On UAM. In: *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2021, San Antonio. 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, p. 1-7.

Ferrare, Felipe Desiglo; Moreira Baum, Derick; De Almeida Junior, Jorge Rady; Camargo Júnior, João Batista; Cugnasca, Paulo Sérgio (2021b). Urban Air Mobility (UAM): A Model Proposal based on Agents using Netlogo. In: *11th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, 2021, Online Streaming. Proceedings of the 11th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. p. 352-359.

Grimm, Volker, Railsback, Steven F., Vincenot, Christian E., Berger, Uta, Gallagher, Cara, DeAngelis, Donald L., Edmonds, Bruce, Ge, Jiaqi, Giske, Jarl, Groeneveld, Jürgen, Johnston, Alice S.A., Milles, Alexander, Nabe-Nielsen, Jacob, Polhill, Gary, Radchuk, Viktoriia, Rohwäder, Marie-Sophie, Stillman, Richard A., Thiele, Jan C. and Ayllón, Daniel (2020).

"The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism", Journal of Artificial Societies and Social Simulation 23 (2) 7 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/23/2/7.html>. doi: 10.18564/jasss.4259

Maget ,C.; S. Gutmann and K. Bogenberger (2020). "Model-based Evaluations Combining Autonomous Cars and a Large-scale Passenger Drone Service: The Bavarian Case Study," *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294183.

Montambault, S., J. Beaudry, K. Toussaint and N. Pouliot (2010). "On the application of VTOL UAVs to the inspection of power utility assets," *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, pp. 1-7, doi: 10.1109/CARPI.2010.5624443.

Postorino, M.N.; Sarné, G.M.L (2020). "Reinventing Mobility Paradigms: Flying Car Scenarios and Challenges for Urban Mobility" *Sustainability* 12, no. 9: 3581. https://doi.org/10.3390/su12093581

Reiche, C.; C. McGillen, J. Siegel and F. Brody (2019). "Are We Ready to Weather Urban Air Mobility (UAM)?" *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICNSURV.2019.873529.

Reiche, C.; C. McGillen, J. Siegel and F. Brody (2019). "Are We Ready to Weather Urban Air Mobility (UAM)?" *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICNSURV.2019.8735297.

Thiele, Jan C., Kurth, Winfried and Grimm, Volker (2014). 'Facilitating Parameter Estimation and Sensitivity Analysis of Agent-Based Models: A Cookbook Using NetLogo and 'R" Journal of Artificial Societies and Social Simulation 17 (3) 11 <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/17/3/11.html>. doi: 10.18564/jasss.2503.

Vempati, L.; M. Geffard and A. Anderegg (2021). "Assessing Human-Automation Role Challenges for Urban Air Mobility (UAM) Operations," *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/DASC52595.2021.9594358.

Wilensky, Uri. (1999). NetLogo. http://ccl.northwestern.edu/netlogo/. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, Northwestern University, Evanston, IL.

Wilensky, U. (2011). Netlogo Airplane Landing Example 3D. http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/AirplaneLandingExample3D. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

Wilensky, Uri; William Rand (2015). *Introduction to agent-based modeling modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. Cambridge, Mass MIT Press.

FATORES DE ESCOLHA NA COMPRA DE PASSAGEM AÉREA: IMPORTÂNCIA PERCEBIDA E FREQUÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES PELOS CONSUMIDORES

George Christian Linhares Bezerra1, Brenno Ribeiro Ferreira2, Carla Gonçalves Leite3, Christian André Haddad Govastki4
george.bezerra@student.uc.pt / Centre for Business and Economics Research - CeBER;
brenno.ferreira@a.ucb.br / Universidade Católica de Brasília - UCB;
carlaleite.publicidade@gmail.com - Centro Universitário Estácio;
chrisgovastki@yahoo.com.br / Universidade de Brasília - UnB

PAPER ID: SIT212

RESUMO

O objetivo principal deste artigo é examinar a percepção dos passageiros acerca de fatores de escolhas na compra de passagem aérea. Especificamente, busca-se identificar o grau de importância relativa desses fatores e a frequência declarada de utilização de informações relacionadas à oferta de transporte, inclusive quanto ao exame de diferenças entre grupos de respondentes conforme seus hábitos de viagem. Para tanto, foi realizada pesquisa de levantamento junto aos usuários do transporte aéreo no Brasil. A análise dos dados compreendeu quatro etapas: estatística descritiva, análise de agrupamento, análise de diferença de grupos e análise de GAP. Os achados indicam a importância relativa de cada fator e a frequência de utilização das informações, sugerindo diferenças significativas nos padrões de resposta entre grupos de passageiros, com base na frequência de viagem. Além disso, identificou-se fatores cuja importância relativa apresenta-se menor que a frequência de utilização de informações a si relacionadas. Em conclusão, o estudo contribui para uma melhor compreensão acerca do comportamento dos consumidores em relação aos diferentes fatores de escolha para a compra de passagem aérea, inclusive quanto à segmentação de passageiros. Os achados podem orientar atividades de planejamento e gestão de atores do setor e fomentar futuras pesquisas sobre o tema.

Palavras-Chave: Fatores de Escolha; Comportamento do Consumidor; Transporte Aéreo; Passagem Aérea.

1. INTRODUÇÃO

O setor de transporte aéreo tem passado por significativas mudanças estruturais, ditadas pelo crescimento da demanda, pela evolução tecnológica e pelo movimento em direção a menor regulação. Embora inicialmente um modal exclusivo para públicos de maior poder aquisitivo, a evolução tecnológica e o aumento da demanda possibilitaram ganhos de escala e um ambiente de negócios mais atrativo à iniciativa privada, com menor necessidade para atuação estatal (Zimmermann & Oliveira, 2012).

São características do setor no presente cenário a operação com margens operacionais reduzidas, a concorrência com base em preço, a importância crescente das receitas obtidas por serviços acessórios e a busca pelo reconhecimento e atendimento das necessidades dos segmentos de passageiros como estratégia de diferenciação (Scotti et al., 2016).

Analisando um contexto mais recente da aviação, percebe-se também a tendência de empresas aéreas em ofertar serviços acessórios ao transporte de forma desagregada. Esta tendência acompanha outros setores de serviços, consistindo em estratégia de precificação na qual elementos não essenciais do transporte são oferecidos como complementares e cobrados à parte. Essa estratégia tende a produzir alterações, também, nos hábitos de utilização dos consumidores (Yimga e Gorjidooz, 2019).

Diante dessa realidade de mercado, é relevante compreender os fatores que afetam a escolha dos consumidores. Portanto, as empresas aéreas devem não apenas estar preocupadas em fornecer um serviço de qualidade, mas também reagir tempestivamente e de forma adequada às mudanças nas necessidades do público consumidor (Liou e Tzeng, 2010). Ainda, deve ser destacado que é crescente o interesse pela identificação de segmentos de consumidores e compreensão dos padrões atitudinais associados a esses segmentos (Bezerra et al., 2021).

No que diz respeito ao comportamento do consumidor, sob a ótica concorrencial, conhecer os fatores que afetam esse comportamento é elemento fundamental para as estratégias de marketing da empresa aérea. A partir disso, a empresa pode planejar rotas e horários para melhor se adaptar ao seu público, além de definir outros aspectos que podem influenciar na escolha do consumidor (Munoz e Laniado, 2021).

Nesse sentido, no contexto do transporte aéreo, a literatura recente sugere que a decisão de escolha dos consumidores é dependente em significativo nível da quantidade de informações disponíveis acerca dos preços, dos serviços inclusos (Brochado et al, 2019), do horário do voo, além de fatores como a percepção de segurança, confiabilidade da empresa aérea, benefícios de programas de milhagem e do trajeto (Seelhorst & Liu, 2015). Destaca-se ainda que as características dos consumidores também são determinantes para a escolha, sendo possível assumir diferentes padrões de comportamento com base na motivação para a viagem, natureza do voo (doméstico ou internacional) e na experiência do consumidor em termos de frequência de utilização do transporte aéreo (Bezerra et al, 2021).

Assim, o presente artigo tem como objetivo principal examinar a percepção dos passageiros acerca dos fatores de escolha para compra de passagem aérea. Especificamente, busca-se identificar o grau de importância relativa desses diferentes fatores e a frequência declarada de utilização de informações relacionadas à oferta de transporte aéreo, inclusive quanto ao exame de diferenças entre grupos de respondentes conforme sua frequência de viagem.

É notável que o tema dos fatores de escolha no transporte aéreo tem sido explorado pela literatura, mediante o uso de diferentes abordagens metodológicas. Contudo, há escassez de estudos voltados para a realidade do mercado brasileiro, especialmente considerando o contexto da percepção e atitude dos consumidores no cenário de impactos decorrentes da Pandemia da Covid-19. Portanto, este artigo têm o potencial de contribuir para melhor compreensão sobre os fatores de escolha para compra de passagens aéreas no contexto estudado.

2. FATORES DE ESCOLHA NO TRANSPORTE AÉREO: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão da literatura de interesse para o objeto deste artigo foi realizada de acordo com o método Revisão Sistemática da Literatura (Systematic Literature Review - SLR), orientado para identificar, avaliar e resumir estudos para

responder a uma ou mais questões de investigação, enquanto busca reduzir erros sistemáticos ou vieses (Petticrew e Roberts, 2006). A SLR prevê que os procedimentos de pesquisa devem ser documentados de forma a prover rastreabilidade quanto ao processo de revisão, incluindo as fontes de dados, os critérios de busca utilizados e as categorias analisadas (Ginieis et al., 2012).

No atual ambiente de negócios, é relevante compreender a natureza da escolha do consumidor sob uma perspectiva empírica, considerando o estado-da-arte da literatura sobre o tema. Portanto, o objetivo da SLR realizada foi identificar os principais achados empíricos no que tange aos fatores que determinam a escolha do consumidor por empresa aérea, tendo como questão de partida: Que fatores têm sido mais recorrentes quanto a frequência de uso em modelos empíricos?

Para tanto, foram utilizadas as seguintes fontes em linha: Elsevier Online Base de dados (Science Direct), Emerald Insight, SAGE Publications, SpringerLink, Taylor & Francis, Wiley Online Library, Blackwell, Scopus e Proquest. Ainda, pelo interesse em garantir uma representatividade para a pesquisa brasileira, foi considerada a base de dados Scielo.

O período de interesse compreendeu de 1980 a Abril/2020. O esforço de investigação foi empreendido de 04/2021 a 06/2021. Os termos de busca compreenderam palavras-chave diretamente ligadas ao transporte aéreo, seguindo duas fases. A primeira fase utilizou termos mais gerais, com as seguintes palavras-chave combinadas entre si: airline, choice + airline, behavior + passenger, choice. A segunda fase visou identificar os vários aspectos relacionados com a influência de escolha, para o que foram conectados outros termos referentes aos vários aspectos previamente identificados na primeira fase às palavras "airline" e "choice", tais como: segurança, horário de voo, cancelamento, atraso, programa de milhagem, aeroporto, qualidade dos serviços, concorrência, satisfação e segurança.

Sob a luz das questões de investigação abordadas, os documentos foram avaliados e classificados conforme as seguintes categorias: i) Período da publicação; ii) Natureza do estudo (empírico, conceitual, estudo de caso, revisão de literatura, simulação, relatório ou estudo de caso); e iii) Fatores de escolha mais enfatizados.

Esta etapa de tratamento dos dados é particularmente importante por garantir a representatividade da amostra, uma vez que o critério preliminar de validade dos documentos (presença de termos de busca) é objetivo e se volta para a identificação do maior número de documentos potencialmente relevantes. Após exame dos resumos/abstracts desse conjunto de documentos, foram excluídos 16 por não ter relação com o objeto de pesquisa - fatores de escolha no transporte aéreo. Assim, 180 documentos foram selecionados para análise, classificação e interpretação dos resultados. A tabela 1 mostra a quantidade de documentos publicados por ano, indicando que é a partir de 2014 que a frequência de publicações começa a aumentar.

Tabela 1: documentos por ano

Ano	*Publicações*	*Ano*	*Publicações*
1985	1	2010	2
1992	1	2011	6
1998	4	2012	5
1999	1	2013	4
2000	1	2014	10
2001	1	2015	9
2004	3	2016	13
2005	1	2017	18
2006	4	2018	20
2007	4	2019	26
2008	3	2020	36
2009	5	2021	2

Nota: Nos anos ausentes não houve publicações

Quanto à natureza do estudo, tem-se que a maior parte é empírica, sendo possível evidenciar diferente métodos de pesquisa utilizados, com predominância de modelos econométricos diversos e análises ad hoc baseadas em otimização.

Finalmente, como resultado dos procedimentos realizados, foram identificados como fatores de escolha mais recorrentes na literatura, em ordem decrescente: preço, disponibilidade (rota ou horário do voo), confiabilidade/segurança, qualidade de serviço, serviço de bordo, programa de milhagem e imagem da empresa.

Assim, foi possível identificar o preço da passagem como fator mais frequente, estando presente como um dos três fatores mais influentes em modelo empíricos em 74 dos 180 trabalhos analisados (41% do total). Em seguida, mantendo-se a abordagem de análise, tem-se: Disponibilidade (rota/horário) (37/20,0%), Confiabilidade/segurança (27/15,0%), Qualidade de serviço (23/13,0%), Serviço de bordo

(9/5,0%), Programa de milhagem (5/3,0%) e Imagem da empresa (4/2,0%).

Um ponto relevante na análise da literatura diz respeito à possibilidade de diferentes padrões de escolha por grupos de consumidores quanto à sua frequência de viagem e motivo da viagem (Lazer/turismo, família, negócios). Os achados indicam que segmentos de viajantes por motivo de lazer/turismo são mais sensíveis ao preço e mais flexíveis quanto ao horário, rota e aeroporto utilizado, por exemplo. Por outro lado, viajantes de negócios e viajantes frequentes tendem a demonstrar maior resiliência ao preço, valorizando as conveniências na oferta do voo.

Em síntese, conforme a literatura sobre fatores de escolha, observa-se que, nesse ambiente de negócios, é relevante compreender a natureza da escolha do consumidor por empresa aérea sob uma perspectiva empírica, considerando o estado-da-arte da literatura sobre o tema, mas atentando-se aos aspectos contextuais de cada mercado, o que justifica a realização da pesquisa relatada neste artigo.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos estabelecidos, adotou-se a técnica de pesquisa de levantamento (survey). Conforme Gil (2008), é técnica de investigação científica caracterizada pela interrogação direta aos sujeitos cujo comportamento, preferências, percepções, atitudes ou outros traços se deseja conhecer. Assim, procedeu-se à solicitação de percepções e declarações dos respondentes para, mediante análise quantitativa, extrair conclusões gerais quanto à importância de diferentes fatores de escolha e frequência de utilização de informações na compra de passagem aérea.

O questionário foi composto por três blocos. O primeiro requereu a declaração da percepção de importância para um conjunto de fatores de escolha. Para indicação da resposta, foi utilizada uma escala de intensidade de cinco pontos, sendo 1 para nada importante e 5 para muito importante. O segundo bloco requereu a declaração da frequência de utilização de diferentes informações no processo de decisão de compra, também conforme escala de cinco pontos, sendo 1 para nunca consultei e 5 para sempre consultei. Finalmente, o terceiro bloco compreendeu o perfil de consumo e sociodemográfico, requerendo respostas para escolaridade, idade, gênero, motivo das últimas viagens e frequência de viagens.

Os itens utilizados no primeiro e segundo blocos foram extraídos da análise dos achados decorrentes dos procedimentos da revisão sistemática de literatura, como relatados na seção anterior. A redação desses itens foi inicialmente validada com um grupo de usuários do transporte aéreo, de forma qualitativa e, em seguida, por meio de aplicação de pré-teste online. O instrumento do pré-teste foi divulgado por meio de redes sociais durante uma semana, obtendo-se 59 respostas completas. Os resultados dessa testagem sugeriram adequado comportamento das respostas para cada item e comentários adicionais coletados possibilitaram melhorias pontuais de redação.

A divulgação do instrumento de coleta de dados ocorreu por meio de inserções nas redes sociais da Agência Nacional de Aviação Civil, com frequência mensal, tendo ocorrido encaminhamentos do conteúdo dessas inserções (postagens) por outras páginas, especialmente outros órgãos públicos, profissionais do setor e páginas de conteúdo de turismo. Portanto, o formulário foi disponibilizado ao público como convite para participação voluntária. Ao final do período de coleta, foram obtidas 3.022 respostas.

Quanto à análise dos dados, compreendeu quatro etapas. Primeiramente foram produzidas estatísticas descritivas para os itens de importância relativa e frequência de utilização. Em seguida, esses itens foram analisados por meio de técnica de agrupamento. Na terceira etapa, foram realizados testes de diferença entre grupos de passageiros conforme sua frequência de viagem. Finalmente, uma vez que alguns dos itens foram considerados pelos respondentes tanto para identificação de sua percepção de importância como frequência de utilização, foi utilizada análise de gap.

Para a análise de agrupamento, foi utilizada a técnica K-mean, cujo propósito é classificar um conjunto de dados de acordo com um número fixo de grupos (clusters). Este método é particularmente útil para casos em que o investigador já tem requisitos relativos ao número de grupos a serem considerados distintos (Hair et al., 2019). Neste estudo, o número de agrupamentos foi pré-definido para 3 grupos, a fim de distinguir os itens em três níveis de

importância e frequência de utilização. Assim, a partir das médias para cada item, pode-se interpretar seu agrupamento conforme o nível de importância e frequência de utilização da informação.

Quanto aos testes de diferença entre grupos, o objetivo foi verificar a existência de diferenças significativas nas respostas entre diferentes grupos de passageiros. Coerentemente com estudos prévios, analisa-se as diferenças entre grupos de respondentes com base em sua frequência de viagem (Jung & Yoo, 2014). Utilizou-se a técnica de Análise de Variância (ANOVA), que permite verificar se existe uma diferença significativa entre valores médios enquanto variável dependente da classificação da observação em termos de fatores (ou grupos) (Hair et al, 2019). O nível de significância utilizado foi de 5%, isto é, uma probabilidade de erro (α) de 5% (0,05). Assim, a Hipótese nula (H0) é que as médias populacionais são iguais, suportada pelo resultado com p-valor maior que (α). A Hipótese alternativa (H1) é que as médias são diferentes, assumida a partir de p-valor menor ou igual que (α). A conclusão empírica para H0 é, portanto, que a média comparada entre grupos de respondentes não diverge entre si.

Finalmente, a análise gap foi utilizada para examinar a importância relativa dos fatores de importância em relação à frequência declarada de consulta. Aplicou-se aos itens que possuíam informações associadas: "Histórico de atrasos", "Histórico de cancelamentos" e "Espaço entre assentos". A finalidade foi identificar diferenças entre os valores médios para a importância e a frequência de consulta, a partir da subtração dos valores médios para cada variável multiplicada pela importância média, conforme a seguinte equação:

$$GAP\ i = (IR\ i - FR\ i).IR\ i \qquad (1)$$

Onde: IR i = média da importância declarada.
FR i = média da frequência de consulta declarada.

Destaca-se que as diferenças são multiplicadas pelos seus valores de IR para aumentar as diferenças e promover uma melhor comparação entre os valores. (Simões et al., 2016). Consequentemente, os valores positivos indicam déficit de informação (quanto maior for este indicador, maior é a discrepância entre a percepção de importância e a sua frequência de consulta).

4. RESULTADOS

A coleta de dados resultou no total de 3.022 respostas. No processo de tratamento dos valores ausentes, 463 respostas foram excluídas por apresentarem uma quantidade de itens não respondidos superior a 20% para os blocos I e II e/ou ausência de respostas para os itens do bloco III. A abordagem para o tratamento dos valores ausentes para os itens de escala de intensidade está coerente com referências metodológicas da literatura especializada (Hair et al., 2019). Portanto, tem-se uma amostra útil de 2.559 respostas, cujas características podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características da Amostra

Característica	***Distribuição***	
Motivo Principal para Viagem nos Últimos 5 anos	***Freq.***	***%***
Familiar	424	16,57
Negócios	378	14,77
Turismo/Lazer	1673	65,38
Outros	67	2,62
Observações ausentes	17	0,66
Total	2542	100,00
Quantidade de Viagens por Ano antes da Pandemia Covid-19	***Freq.***	***%***
De 0 a 3 Vezes	1308	51,11
De 4 a 6 Vezes	562	21,96
Mais de 6 Vezes	641	25,05
Nenhuma Vez	35	1,37
Observações ausentes	13	0,51
Total	2546	100,00
Gênero	***Freq.***	***%***
Feminino	799	31,22
Masculino	1738	67,92
Observações ausentes	22	0,86
Total	2537	100,00
Idade	***Freq.***	***%***
Até 17 anos	23	0,90
De 18 a 25 anos	254	9,93
De 26 a 35 anos	701	27,39
De 36 a 45 anos	754	29,46
De 46 a 55 anos	389	15,20
De 56 a 64 anos	273	10,67
Mais de 65 anos	153	5,98
Observações ausentes	12	0,47
Total	2547	100,00
Escolaridade	***Freq.***	***%***
Até Ensino Fundamental	9	0,35
Até Ensino Médio	262	10,24
Até Ensino Superior	1012	39,55
Pós-Graduação	1268	49,55
Observações ausentes	8	0,31
Total	2559	100,00

Legenda: Freq. = Frequência

As estatísticas descritivas para os itens de importância e frequência são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Estatística descritiva dos itens

Importância	*N*	*Média*	*Desvio padrão*	*Erro Padrão*
Menor Preço	2552	4,72	0,68	0,01
Voo Direto	2544	4,32	1,03	0,02
Horário de Partida	2536	4,15	1,06	0,02
Aeroporto Preferência	2534	3,98	1,21	0,02
Segurança da Empresa	2548	3,62	1,49	0,03
Programa Milhagem	2547	3,51	1,41	0,03
Espaço Assento	2553	3,12	1,45	0,03
Histórico de Cancelamento	2552	2,88	1,50	0,03
Histórico de Atraso	2551	2,78	1,46	0,03
Frequência	***N***	***Média***	***Desvio padrão***	***Erro Padrão***
Preço Bagagem	2558	4,23	1,15	0,02
Preço Marcar Assento	2558	4,17	1,17	0,02
Preço Alterar ou Cancelar Passagem	2558	3,98	1,24	0,02
Preço Antecipar Voo	2558	3,25	1,45	0,03
Espaço do Assento	2558	2,87	1,48	0,03
Histórico de Cancelamento	2558	2,51	1,47	0,03
Histórico de Atraso	2558	2,39	1,42	0,03

É possível identificar que o maior valor de média está associado ao item referente à importância do menor preço (4,72), enquanto o menor valor foi atribuído ao item referente à frequência de utilização da informação de histórico de atraso (2,51). Quanto à dispersão dos dados, nota-se o menor desvio-padrão para importância do menor preço (0,68) e o maior para o item importância de histórico de cancelamento (1,50).

4.1. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

Os dados foram analisados por meio de técnica de agrupamento, com uso da técnica K-mean. Para tanto, os valores médios de cada item foram organizados em grupos decrescentes quanto à importância relativa e frequência de utilização de informações.

Referente a importância relativa, os fatores "Menor Preço" e "Voo Direto" constam do grupo de maior grau de importância. Este achado sugere que, além de buscar o menor preço, os passageiros também valorizam o menor tempo de deslocamento, coerentemente com estudos prévios que indicam maior suscetibilidade de escolhas por opções de transporte com tempo de deslocamento mais curto (Philip, 2004).

Por outro lado, os fatores "Espaço Assento", "Histórico de Cancelamento" e "Histórico de Atraso" apresentam-se no grupo de menor grau de importância relativa. De forma geral, é possível assumir que esses fatores não apresentem maior relevância para os passageiros devido à percepção geral de um alto nível de confiabilidade do sistema de aviação civil (ICAO, 2015), percepção confirmada pelos percentuais de voos cancelados e atrasados entre janeiro de 2016 até março de 2020 (decretação do estado de emergência em saúde decorrente da Pandemia da Covid-19) foram da ordem de 2,9% e 6,8%, respectivamente (ANAC, 2020).

Quanto à frequência de consulta de informações, compõem o grupo de mais utilizadas o "Preço para despachar bagagem", "Preço para marcar Assento" e "Preço para alterar ou cancelar a passagem", relacionados a aspectos acessórios da oferta do serviço de transporte (Tuzovic et al., 2014). Enquanto aspectos acessórios, esses itens são objetos de livre precificação, havendo variabilidade entre as ofertas. Este achado sugere que os respondentes reconhecem a necessidade dessas informações para seu processo de tomada de decisão acerca da compra de passagem aérea.

Especificamente quanto ao preço para transporte de bagagem, desregulamentado no Brasil em 2016, verifica-se que esse se tornou uma das informações mais relevantes para a decisão de compra no contexto atual da estratégia de precificação "pay per use", predominante no setor. De fato, a introdução de taxas para aquisição de serviços acessórios tende a promover maior conscientização dos consumidores acerca do efetivo conteúdo da oferta de transporte aéreo, sugerindo uma mudança sistêmica nas relações de consumo no setor (Tuzovic et al., 2014).

Em relação ao preço para marcar assento, os achados sugerem que os respondentes valorizam a marcação de um assento predeterminado, declarando maior frequência de

utilização dessa informação. Nesse sentido, a seleção de assento está entre um dos serviços acessórios considerado como mais importantes para o passageiro, estando diretamente associado à expectativa de uma melhor experiência na viagem (Wittmer e Rowley, 2014).

Ainda quanto às informações com maior frequência de utilização, destaca-se que o passageiro está atento às regras para de alteração e/ou cancelamento da passagem, sugestionando um elevado nível de compreensão pelos consumidores quanto à dinâmica da oferta do transporte aéreo como serviço não estocável, pelo que é prática na indústria precificar os diferentes níveis de propensão ao pagamento de prêmios por tarifas que possibilitem maior flexibilidade.

Tabela 4: Ranking dos fatores de importância

Cluster	*Item*	*Média*	*Desvio Padrão*	*C. Var.*
1	Menor preço	4,72	0,68	0,14
	Voo direto	4,32	1,03	0,23
2	Horário de partida	4,15	1,06	0,25
	Aeroporto de preferência	3,98	1,21	0,30
	Segurança da empresa	3,62	1,49	0,41
	Programa de milhagem	3,51	1,41	0,40
3	Espaço do assento	3,12	1,45	0,46
	Histórico de cancelamento	2,88	1,50	0,52
	Histórico de atraso	2,78	1,46	0,52

Legenda: C.Var. = Coeficiente de variação.

A Tabela 4 acima, demonstra os fatores mais importantes para os passageiros, sendo estes: "Menor Preço" e "Voo Direto" com média de 4,72 e 4,32, respectivamente. Estas médias permitem a visualização de quão relevante são estes dois fatores para o passageiro.

Sobre os itens de informação cuja frequência de consulta é menor, tem-se "Histórico de Atraso" e "Histórico de Cancelamento". Esse achado é coerente com a análise para os itens de importância relativa, podendo ser considerado que o alto nível de confiabilidade do setor é percebido pelos consumidores em seu processo de compra.

Para a frequência de consulta, observa-se o quão relevante é, para o passageiro, ter as informações de preço sobre os serviços acessórios de bagagem, marcar assento e as regras de cancelamento, o que é demonstrado pela alta média, sendo respectivamente, "Preço Bagagem" 4,23, "Preço marcar assento" 4,17 e "Preço alterar/cancelar passagem" 3,98.

Tabela 5: Ranking de frequência de consulta

Cluster	*Item*	*Média*	*Desvio Padrão*	*C. Var.*
1	Preço bagagem	4,23	1,15	0,27
	Preço marcar assento	4,17	1,17	0,28
	Preço alterar/ cancelar passagem	3,98	1,24	0,31
2	Preço antecipar voo	3,25	1,45	0,45
	Espaço do assento	2,87	1,48	0,52
3	Histórico de atraso	2,39	1,42	0,59
	Histórico de cancelamento	2,51	1,47	0,59

Legenda: C.Var. = Coeficiente de variação

4.2. DIFERENÇAS ENTRE GRUPOS DE RESPONDENTES

As análises anteriores possibilitam uma interpretação agregada para os dados declarados pelos respondentes. Contudo, é crescente o reconhecimento de que a segmentação de consumidores é cada vez mais importante no contexto do transporte aéreo (IATA, 2013; Liou & Tzeng, 2010; Park, 2010). Coerentemente com demais estudos, analisa-se as diferenças entre grupos de respondentes considerando sua frequência de viagem (Jung & Yoo, 2014) e adota-se a categoria de viajante frequente para aqueles que declaram viajar mais de 3 vezes, enquanto aqueles com menor frequência foram categorizados como não frequente (Bezerra et al., 2021).

A partir dos procedimentos descritos na seção 3, consolidou-se os resultados na Tabela 6.

No que diz respeito aos itens considerados para grau de importância, identifica-se diferença entre grupos de viajantes frequentes e não frequentes quanto aos seguintes itens: "Espaço assento"; "Segurança da empresa"; e "Programa de milhagem". Para os dois primeiros, o passageiro não frequente declara maior grau de importância, enquanto o passageiro frequente apresenta tendência de perceber como mais importante o programa de milhagem. Esse achado pode estar associado ao fato de que o passageiro não frequente tem menor capacidade de antecipar sua experiência, pelo que valoriza

em maior grau aspectos como conforto e segurança. Por outro lado, o programa de milhagem é algo mais sensível para o passageiro frequente.

Quanto aos itens referentes à consulta de informações, "Consulta espaço do assento" e "Preço para despacho de bagagem" aparecem como mais utilizados por passageiros não frequentes, enquanto informações sobre regras para antecipação do voo e alteração /cancelamento surgem como mais utilizadas por viajantes frequentes. Assim, o passageiro não frequente tem maior sensibilidade aos preços dos serviços acessórios, enquanto o passageiro frequente demonstra mais interesse em conhecer as regras para eventuais alterações do voo. Desta forma é esperado que boa parte dos passageiros frequentes possam ter acesso a serviços como despacho de bagagem e marcação de assentos como benefícios de sua classe de cliente junto às empresas aéreas. Por outro lado, esses mesmos passageiros frequentes estariam mais sujeitos a vivenciar alterações na sua viagem, inclusive por vontade própria.

4.3. ANÁLISE DE GAP

Finalmente, uma vez que alguns dos itens foram considerados pelos respondentes tanto para identificação de sua percepção de importância como frequência de utilização, foi utilizada análise de gap para explorar as diferenças nas respostas de um mesmo respondente quanto aos itens: Histórico de Cancelamento, Histórico de Atraso e Espaço do Assento.

A tabela 7, a seguir, consolida os resultados decorrentes dos procedimentos descritos na seção 3 deste documento. Os resultados indicam um significativo gap no que diz respeito à frequência de consulta em relação ao grau de importância dos três itens.

Ou seja, em geral, o grau de importância é superior à frequência de consulta da informação, sugerindo que o consumidor tende a julgar importante haver a informação, mas não realiza a consulta com frequência antes de comprar a passagem.

Tabela 6: Teste do grupo de frequência de viagem

			Viajante não frequente			*Viajante frequente*		
Importância	***P-Valor***	***Suportada?***	***Média***	***Desvio padrão***	***Erro padrão***	***Média***	***Desvio padrão***	***Erro Padrão***
Menor preço	n.s	Sim	4,73	2,23	0,06	4,23	2,22	0,06
Voo direto	n.s	Sim	4,29	1,91	0,05	4,36	1,96	0,05
Horário de partida	n.s	Sim	4,12	1,80	0,04	4,18	1,84	0,05
Aeroporto de preferência	n.s	Sim	3,98	1,72	0,04	3,98	1,72	0,04
Histórico de atraso	n.s	Sim	2,81	1,42	0,03	2,72	1,44	0,04
Histórico de cancelamento	n.s	Sim	2,92	1,41	0,03	2,81	1,42	0,04
Espaço do assento	*	Não	3,19	1,47	0,03	3,05	1,41	0,04
Segurança da empresa	*	Não	3,75	1,62	0,04	3,47	1,48	0,04
Programa de milhagem	*	Não	3,38	1,46	0,04	3,66	1,56	0,04
Frequência	***P-Valor***	***Suportada?***	***Média***	***Desvio padrão***	***Erro padrão***	***Média***	***Desvio padrão***	***Erro Padrão***
Histórico de atraso	n.s	Sim	2,39	1,53	0,04	2,36	1,54	0,04
Histórico de cancelamento	n.s	Sim	2,52	1,42	0,04	2,49	1,50	0,04
Espaço do assento	*	Não	2,93	1,41	0,03	2,78	1,42	0,04
Preço bagagem	*	Não	4,29	1,91	0,05	4,16	1,83	0,05
Preço marcar assento	n.s	Sim	4,21	1,86	0,05	4,12	1,80	0,05
Preço antecipar voo	*	Não	3,00	1,41	0,03	3,51	1,50	0,04
Preço alterar/ cancelar passagem	*	Não	3,90	1,67	0,04	4,05	1,76	0,05

Legenda: n.s. - não significativo; * $p < 0,05$

Esse achado pode ser compreendido como um enviesamento natural dos respondentes, uma vez que tenderiam a indicar como importante a existência de tais informações, mesmo que, de fato, não façam uso dessas em seu processo de escolha. Isto apresenta-se consistente com achados de Douven (2017), sendo o respondente induzido a atribuir uma importância para a informação, mesmo esta não fazendo parte do seu

cotidiano. Outra interpretação, que assumiria menor presença do viés citado, está relacionada à dificuldade do interessado ter acesso à informação julgada importante, o que resultaria na frequência de consulta em um grau menor do que a importância relativa. Essa interpretação implica na identificação de potencial assimetria de informação.

Tabela 7: Análise de GAP

Item	*IR*	*FR*	*iGAP*
Histórico Cancelamento	2,88	2,52	1,03
Histórico Atraso	2,78	2,39	0,93
Espaço do Assento	3,12	2,87	0,78

Legenda: IR = Importância Relativa; FR = Frequência Relativa; iGAP = Índice de GAP

5. CONCLUSÕES

Os achados deste estudo contribuem para uma melhor compreensão acerca da percepção dos consumidores sobre a importância relativa dos diferentes fatores de escolha para aquisição da passagem aérea, assim como do comportamento usual desses consumidores quanto à efetiva utilização de informações disponíveis acerca desses fatores.

Considerando que foram utilizados fatores derivados da literatura especializada, tem-se uma aplicação prática no contexto do mercado brasileiro de transporte aéreo. Especialmente, os achados referentes ao comportamento de grupos de consumidores que permitem compreender potenciais formas de segmentação de passageiros quanto aos fatores estudados.

Destaca-se que os viajantes frequentes valorizam informações sobre alterações na viagem, tais como antecipação do voo e alteração ou cancelamento, bem como outorgam maior importância aos benefícios do programa de milhagem. Por sua vez, passageiros não frequentes demonstram maior utilização de informações relacionados aos preços de serviços acessórios (bagagem e marcação de assentos), assim como declaram maior importância para aspectos gerais da experiência de voo, como espaço entre assentos e segurança. De modo geral, essas diferenças podem ser explicadas pelo diferente nível de conhecimento sobre a oferta entre esses grupos de passageiros e as particularidades de cada um.

De forma geral, os achados podem orientar a decisão de diferentes atores do setor. Para as empresas aéreas, resta evidente a priorização dos passageiros quanto ao preço e aspectos de conveniência da oferta do voo. As particularidades dos passageiros segmentados por frequência de viagem é importante elemento para o planejamento da oferta. Sob a perspectiva da regulação do transporte aéreo, destaca-se que a compreensão acerca do comportamento geral e de grupos de consumidores quanto à utilização de informações acerca da oferta de transporte permitem evidenciar aquelas informações de utilidade para o passageiro e que, eventualmente, possam demandar uma intervenção regulatória para garantir sua disponibilidade.

Não obstante as contribuições, ressalta-se que o levantamento realizado esteve condicionado a uma abordagem por conveniência, por meio da internet, e compreendeu um período em que os efeitos da Pandemia da Covid-19 se faziam bastante evidentes. Nota-se, contudo, que a abordagem por conveniência pode ser considerada uma forma usual de obtenção de dados. Quanto aos eventuais efeitos do contexto da Pandemia sobre a percepção dos respondentes só poderão ser verificados após a cessação desses efeitos.

Face à relevância do tema para a tomada de decisões dos agentes do setor de aviação civil, tem-se como um possível desenvolvimento para estudos futuros o aprofundamento sobre o processo de tomada de decisão do consumidor, inclusive quanto à experiência de compra em si e potencial influência do processo de publicidade das empresas aéreas. Outro ponto de interesse diz respeito à sensibilidade dos consumidores à variação de preços e padrões de horários em rotas com maior competição, o que pode contribuir para melhor compreensão acerca da tolerância dos compradores às variações nesses dois importantes fatores de escolha.

Referências

ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil, (2020) *Anuário do Transporte Aéreo, 2020.* Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-

aereo/anuario-do-transporte-aereo

Bezerra, G. C. L.; e Souza, E. M.; Correia, A. R.; (2021) *Passenger Expectations and Airport Service Quality: Exploring Customer Segmentation.* Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2675, Issue 10.

Brochado, A.; Rita, P.; Oliveira, C.; Oliveira, F.; (2019) *Airline passengers' perceptions of service quality: themes in online reviews.* International Journal of Contemporary Hospitality Management, Vol. 31 No. 2, pp. 855-873.

Douven, I.; (2017) *A Bayesian perspective on Likert scales and central tendency*. Psychon Bull Ver. 25, pp. 1203-1211

Gil, A.C., (2008) *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6 Ed., São Paulo: Atlas.

Ginieis, M.; Rebull, M V. S.; Planas, F. C.; (2012) *The academic journal literature on air transport: Analysis using systematic literature review methodology.* Journal of Air Transport Management, Vol. 19, pp. 31-35.

Hair, J. F.; Black, W. C.; Babin, J B.; Anderson, R E.; (2019) *Multivariate data analysis*, Pearson Education Limited, 8th edition.

IATA; (2013) *Annual Review*, Disponível em: https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/iata-annual-review-2013-en.pdf Acessado em 12/07/2022.

ICAO; (2015) *USOAP*, Disponível em: https://www.icao.int/safety/pages/usoap-results.aspx Acesso em 22/08/2022.

Jung, S.-Y. & Yoo, K. E.; (2014) *Passenger airline choice behavior for domestic short haul travel in South Korea*, Journal of Air Transport Management, Vol. 38, pp. 43-47, ISSN 0969-6997.

Liou, J. H. J. e Tzeng G. W.; (2010) *A Dominance-based Rough Set Approach to customer behavior in the airline market*, Information Sciences, pp. 2230-2238, ISSN 0020-0255.

Munoz, C. e H., Laniado.; (2021) *Airline choice model for international round-trip flights: The role of travelers' satisfaction and personality traits.* Research in Transportation Economics, Vol. 90, pp. 101-121, ISSN 0739-8859.

Park, J.-W.; (2010) *The effect of frequent flyer programs: A case study of the Korean airline industry*. Journal of Air Transport Management, Vol. 16, Issue 5, pp. 287-288.

Petticrew, M. e Roberts, H.; (2006) *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*. Blackwell Publishing, Oxford.

Philip, G.; (2004) *Does Price Matter? Price and Non-Price Competition in the Airline Industry*. Kansas State University

Scotti, D.; Dresner, M.; Martini, G.; (2016) *Baggage fees, operational performance and customer satisfaction in the US air transport industry*. Journal of Air Transport Management, Vol. 55, pp. 139-146, ISSN 0969-6997.

Seelhorst, M. e Liu, Y.; (2015) *Latent air travel preferences: Understanding the role of frequent flyer programs on itinerary choice*, Transportation Research Part A, Vol. 80, pp. 49-61, ISSN 0965-8564.

Simões, J.M.; Gomes, C.F.; Yasin, M.M.; (2016) *Changing role of maintenance in business organizations: measurement versus strategic orientation.* Int. J. Prod. Vol. 54, Issue 11.

Tuzovic, S.; Simpson, M.C.; Kuppelwieser, V. G.; Finsterwalder, J.; (2014) *From 'free' to fee: Acceptability of airline ancillary fees and the effects on customer behavior*. Journal of Retailing and Consumer Services, Vol. 21, Issue 2, pp. 98-107, ISSN 0969-6989.

Wittmer, A. e Rowley, E.; (2014) *Customer value of purchasable supplementary services: The case of a European full network carrier's economy class.* Journal of Air Transport Management, Vol. 34, pp. 17-23, ISSN 0969-6997.

Yimga, J. e Gorjidooz, J.; (2019) *Airline schedule padding and consumer choice behavior*, Journal of Air Transport Management Vol. 78, pp. 71-79.

Zimmermann, N., Oliveira, A.V.M., (2012). *Liberalização econômica e universalização do acesso no transporte aéreo*. Journal of Transport Literature, Vol. 6.

BENEFITS OF A PAVEMENT MANAGEMENT PROGRAM WITH PCI-BASED ANALYSES WITHIN MILITARY AIRPORTS

Anthony Belo Vasconcelos Santos[1], Ricardo Miranda Cordovil [2], Rafaela Malafaia Nassif Dagher [3], Hudson Gomes de Moraes [4].
Diretoria de Infraestrutura da Aeronáutica (DIRINFRA), Comando da Aeronáutica.

Corresponding author e-mail address: anthonyabvs@fab.mil.br [1]; cordovilrmc@fab.mil.br [2]; rafaelarmnd@fab.mil.br [3]; moraeshgm@fab.mil.br [4]

PAPER ID: SIT142

ABSTRACT

The main objective of this paper is to present analyses of a Pavement Management Program (PMP) within airside pavements managed by the Brazilian Air Force. The assessed pavement network sums up 4.2 million square meters of pavement surfaces along territory of Brazil. Pavement data comprehends Pavement Condition Index (PCI) evaluations. Analyses tools incorporate PCI prediction models, premises for choosing Maintenance and Repair (M&R) services, estimated service costs and network level analyses. PCI-based indicators were generated within the assessed pavement network. Projections were developed among strategies of "do-nothing", budget-restriction, and ideal performance scenarios for a time horizon of 15 years. Results are presented summarized in multi-annual interventions plans, highlighting financial and pavement performance impacts as consequence of each strategy presented by each scenario. It is emphasized a PMP adoption on an airports network level, specially by central managers responsible for managing infrastructures as a central entity, as commonly found on public administration scale.

Keywords: Airport Pavement Management Program (PMP); Pavement Management System (PMS); Pavement Condition Index (PCI).

1. INTRODUCTION

It is expected that pavement surface condition on runways, taxiways and aprons deteriorate due to traffic and climate actions over time. Therefore, pavement condition indexes, mainly used upon engineering assessment methods, are broadly used by authorities for pavement management purposes (Shahin, 2005; Bernucci *et al.*, 2022).

Main airports infrastructures cover great surface areas. Therefore, deterioration of these areas must be accounted upon budget planning by airport infrastructure managers. Hence, it is pressing the need for diagnosis, monitoring and rational intervention on surface and infrastructures related to operational airport pavements on airside in a systematic Pavement Management Program (PMP), also commonly referred as Pavement Management System (PMS) (Haas, Hudson and Zaniewski, 1994; Shahin, 2005).

The use of the Pavement Condition Index – PCI (ASTM, 2020) to determinate the functional quality on airside pavement surfaces is an important tool to support an efficient PMP (USAF, 2017; ANAC, 2017). The PCI consists of a practical method to determine, in an objective way, a condition score from 0 to 100, giving a rational and objective basis for determining M&R needs (Shahin, 2005; FAA, 2014; ANAC, 2017).

Combined with Maintenance and Repair (M&R) premises and analysis, a PMP should not only give an actual diagnostic of present pavement conditions but can also be used to predict pavement performance and forecast budget needs.

This paper presents results of an engineered assessment method for supporting decision-making and airport authorities over M&R strategies using PCI as main index. Its main goal is to give authorities a criterion for directing M&R services to better efficiency practices, answering main questions as *where*, *when* and *how much*. It has proven to be an efficient tool not only for that aim, as well as to spread PMP culture.

Analyses were conducted within data from PCI evaluations on 18 airports between 2018 and 2021, accounting for more than 4,2 million square meters of pavement surfaces. The airports network evaluated is scattered among all Brazilian territory. PCI evaluations were combined with PCI predicting models, M&R strategies premises and estimated costs of interventions. Results are presented on three scenarios: do-nothing; annual budget restriction; and ideal performance within no budget restriction. Analyses are conducted for a 15-year horizon of planning.

Results also conclude for an alternative way of processing data from different airports within a network managed by a single main manager, such as found on public-levels administration.

2. METHOD

Within PCI evaluations, airport pavements are divided into Branches as a single entity according to its function (*a.g.*. runways, taxiways and aprons). Branches are divided into Sections according to surface conditions, service history and function. Each Section is divided into Sample Units where pavement surface distresses are noted by quantity, type and severity on a sample method that determines the number of inspected Sample Units. The distress data is used to calculate the PCI for each Sample Unit inspected, and, therefore for Sections (ASTM, 2020).

Although PCI evaluation does not have the purpose of structural evaluation (capacity), nor to give direct roughness and friction indications, it relates directly with M&R needs and indirectly with structural and functional integrity (Shahin, 2005).

This paper presents PCI evaluations conducted on 18 airports, from where 14 belonged to exclusive military facilities and 4 within airports that also have pavement managed by civil authorities. The airports network has 3C and 4E categories according to ICAO (ANAC, 2021). It is estimated that the whole pavement inventory, which comprehends airports that have not been evaluated yet, accounts for 5 million square meters of pavement surface, from where 800,000 m² were not inspected until the end of 2021 (14 shared civil-military and 2 only military airports). Figure 1 shows distribution of the airfields on Brazil territory.



Figure 1. Geographical locations of inspected and not inspected airports.

Pavement data from the inspected pavements surfaces were compiled within a structured database on Excel sheets. The entire evaluated pavements inventorying comprehends 504 Sections, which 206 are on runways, 145 on taxiways and 153 on aprons. Information about pavement surface type (*i.e.* Asphalt Concrete – AC or jointed Portland Cement Concrete - PCC), distresses, PCI and Section area were compiled in a single airport-database for each airport.

Data of PCI evaluations among military airfields were used by Batista (2015) for developing specific PCI prediction models. These models were calibrated by polynomial regressions and uses time, in years (I), as main variable. Other parameters such as climate and traffic effects were incorporated intrinsically, since pavements were exposed to degradation inherent to those effects over the years.

$$PCI = \beta_0 + \beta_1 \cdot I + \beta_2 \cdot I^2 + \cdots + \beta_x \cdot I^x \quad (1)$$

Where β_x are calibration coefficients. The airfields used by Batista (2015) to calibrate and validate these models are scattered along Northeast, Southeast and South regions of Brazil. Table 1 shows models coefficients as well as the coefficient of determination (R^2) for validated models, showed by each ICAO code. A "general" prediction model was also validated, obtained from a calibration from all combined data. Figure 2 shows a chart representation for the presented models.

Table 1. Models used in analyses over pavement PCI performance prediction. Source: Batista (2015).

Coefficient	SBSC	SBAN	SBBR	SBRF	SBCO	SBGW	GERAL
β_0	100	100	100	100	100	100	100
β_1	-4,221	-1,0118	-4,9336	-10,895	-3,4473	-9,1921	-4,5705
β_2	0,3582	-0,5207	0,3182	0,9329	0,0058	0,9265	0,2141
β_3	-0,0169	0,039	-0,0122	-0,0278	0	-0,0319	-0,0071
β_4	0	-0,0009	0	0	0	0	0
R^2	0,85	0,84	0,85	0,89	0,98	0,79	0,82
n	29	50	17	15	8	10	128

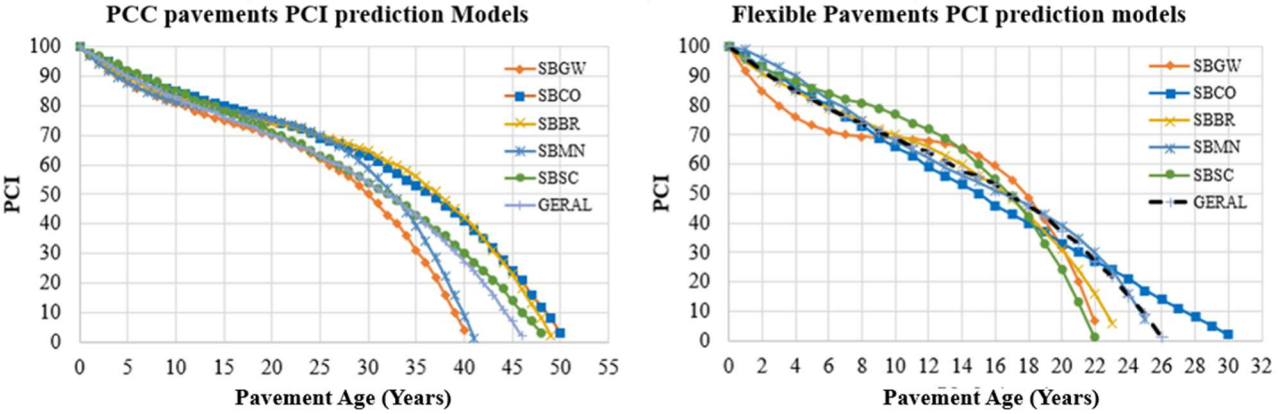


Figure 2. Chart representation from calibrated and validated models for AC and PCC pavements. Source: Batista (2015).

For airfields that do not have a calibrated and validated model, it was chosen to apply the general model. It is known that this approach might cause impact on data reliability, but the

proximity between curves and results presented in Figure 2 corroborate for reliable data application in a network level analyses.

Cordovil (2010) studied a PMP practical applicability on military airfields in South Region of Brazil. The author elaborated categories for M&R services according to pavement surface characteristics (CA or PCC) and range of PCI. From this study, it was estimated PCI increase after M&R services per "intervention zones". These values were estimated based on an empirical database from expertise of engineers and previous experiences within engineering assessment. The values for PCI increase per intervention zone and respective M&R service are shown in Table 2.

Table 2. Intervention Zone for each PCI interval expected PCI increase and M&R associated. Source: authors.

PCI interval	Intervention Zone	Expected PCI Increase	M&R Service
71 - 100	Localized (Preventive Maintenance)	10	Crack Sealing
			Partial-Depth Patching
			Rejuvenation
26 - 70	Global (Repair)	25	Crack Sealing
			Full-Depth Patching
		40	Overlay
0 - 25	Major (Reconstruction)	100	Reconstruction

Service costs are calculated according to estimated Section area that will receive the suggested M&R service. This approach considers the distress types and PCI values. It is expected that the repaired area increases as distress severities get worse, or even implying in change of scope of the service if too deteriorated.

To better exemplify this approach, it is expected that transverse and longitudinal cracks associated with higher PCI, as an excellent condition (86 – 100), would imply in crack sealing in 10% of Section surface area as a M&R service choice, whereas the same distress type associated with a fair PCI condition would imply the same M&R solution in 20% of Section area. Similarly, the same distress associated with a very poor to serious PCI Section (10 – 40), which is a result of greater severities or combination with other distress types, would imply in overlay or reconstruction as M&R services.

Those values were empirically calibrated and are being object of current monitoring at on-going studies. It is emphasized that this approach has been used for network level analyses in PMP purposes, not being used or recommended for project level analyses.

In addition to M&R service selection premises, costs are estimated by service components within M&R techniques. These costs, elaborated for each M&R service, are parameterized on R$/m² for every airfield within the analyzed network. To accomplish that, services patterns are incorporated for component consumption, as assuming a 5 cm milling depth for every milling service, or, similarly, a 2,4 ton/m³ as Hot Mixture Asphalt (HMA) specific gravity.

Components and compositions costs are extracted from official database as found in SINAPI and SICRO 3 cost systems (BRAZIL, 2013). Mobilization, construction site and indirect costs (overhead, equipment and labor burden) are also considered following interval recommendations from the *Tribunal de Contas da União* (official governmental entity).

To accomplish the pavement intervention planning within network level analyses, a trigger for M&R intervention is needed. For solving this problem, it was used criterion defined by ANAC (2017), as recommended by Shahin (2005), where 41 < PCI < 70 would imply on repair techniques. Using this approach, PCI average were calculated for every airfield Branch within the airfields network. The average is chosen for best sampling the great amount of data from 18 different airfields.

Different scenarios were created using the presented approaches and premises within 15 years as time horizon (2022 – 2036). A do-nothing scenario was generated for comparison purpose. A budget-restriction scenario was created, assuming a R$ 25 million per year as budget constraint for the assessed network. An ideal performance was created using a mean of PCI under 70 per Branch as trigger for action. Similarly, a 41 < PCI < 70 criterion were used for a "minimal performance" scenario, where PCI reaching 70 was used as trigger for M&R intervention on runways and PCI reaching 41 as trigger for taxiways and aprons. The results of

this last scenario are not demonstrated in this paper due to limited content and summarizing purposes.

Some inflation had to be added to cost analyses. The value of 6,5% per year was used from FGV (2021) references as *Índice Nacional da Construção Civil* - INCC database for historical data (2007 – 2021). This index is commonly used in Brazil for constructions-related budget assessments.

3. RESULTS

Figure 3 shows a satellite image of one of the evaluated airfields. Some examples of pavement distresses are shown for AC (high severity raveling resulted from advanced aging) and PCC (medium severity spalling-corner).



Figure 3. Satellite image of one of the evaluated airfields showing some distresses found on pavement surfaces. Source: authors.

Next sections show each elaborated scenario: do-nothing (Scenario 1); budget-restriction (Scenario 2); and ideal performance (Scenario 3).

3.1. Scenario 1 – Do-nothing

Figure 4 presents a sketch of PCI results of PCI evaluation data processed within a do-nothing scenario for the airfield showed in Figure 3. This way of presentation of Sections is chosen for processing data over Excel sheets. Accumulated costs are also shown as result of doing nothing within M&R solutions over time.

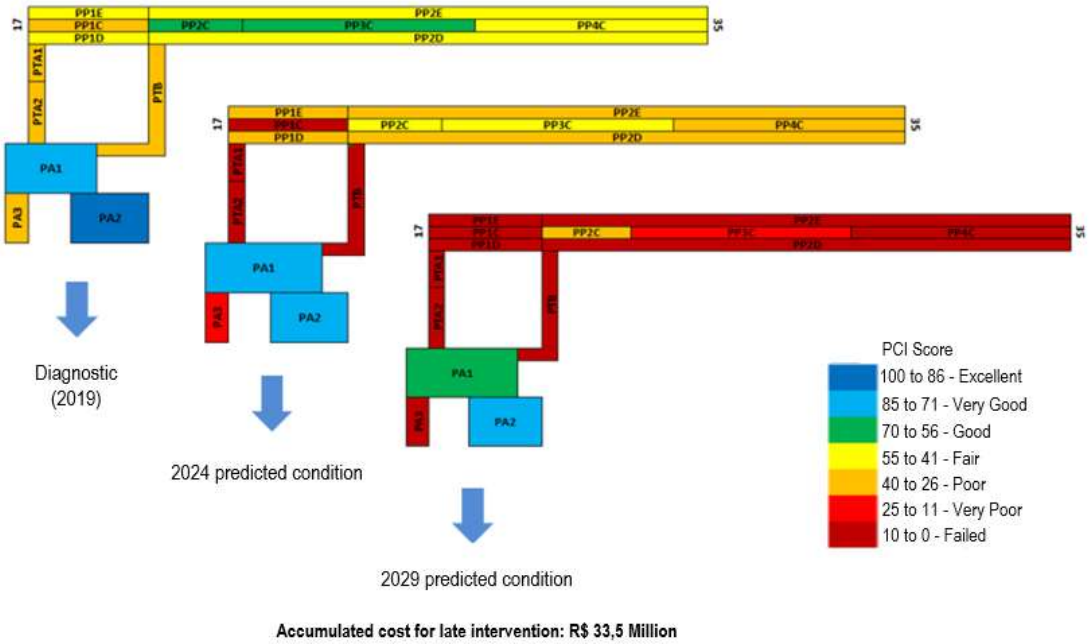


Figure 4. Projections of PCI performance per Section in evaluated airfield within the airfields network.

Similar projections within this scenario were compiled in a single chart with main indicators for the evaluated pavement inventory, which comprehends 4,2 million m² of pavement surface. The indicators are PCI-based and are obtained from every Branch in each airfield and are: overall PCI average for the whole pavement inventory, which takes into account Branches areas for calculating weighted averages; Maximum PCI average; Minimum PCI average; percentage of pavement surface area in worst conditions (reconstructions required); percentage of pavement under repair needs (41 < PCI < 70); and percentage of pavement under preventive maintenance needs (PCI > 70). The compiled information is shown in Figure 5.

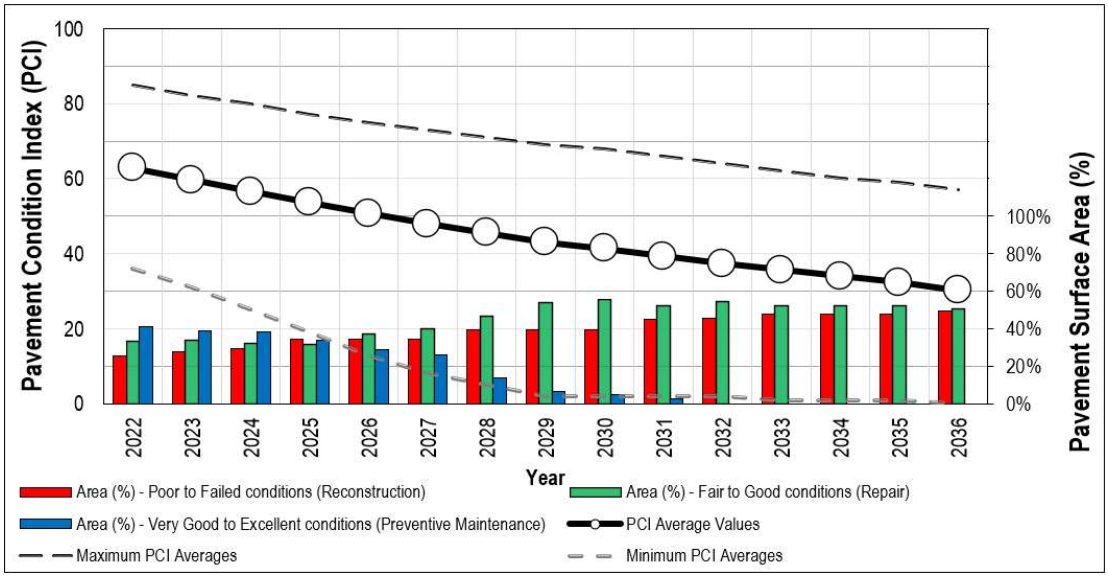


Figure 5. Time horizon of analyses compiling main PCI indicators for the whole pavement inventory.

The PCI-based indicators show a reduction in overall PCI quality over the years. This is expected due to PCI prediction models developed by Batista (2015) and as also demonstrated by Henrique & Motta (2013). It is expected an increase from 23% in 2022 to 50% in 2036 on pavement Reconstruction needs. It is expected a decrease from 41% in 2022 to 0% in 2036 of Preventive Maintenance needs. This is due to overall pavement deterioration in a do-nothing scenario.

Financial analysis shows a R$ 1,6 billion deferred maintenance backlogs by 2036 in pavement M&R services (50% reconstruction and 50% repair), which is equivalent to R$ 632 million brought to 2022 values (6,5%/year). Figure 6 shows the accumulated cost on 15 years as time horizon with inflation and without it. The no-inflation costs are shown to highlight intervention needs generated exclusive by pavement deterioration. The no-inflation analyses show an increase from R$ 325 million to 673 million in 2036, which sums up more than twice the value for M&R needs after 15 years of no intervention. This calculation indicates the cost of "doing nothing", important indicator for decision-makers and to spread pavement management culture.

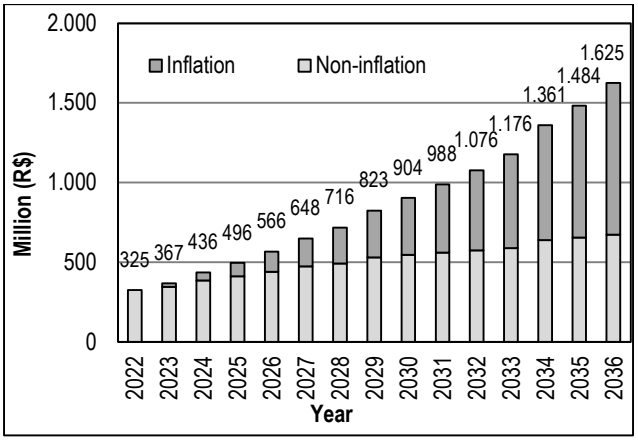


Figure 6. Accumulated costs for M&R need in a do-nothing scenario.

3.2. Scenario 2 – Budget-restriction for M&R services

Figure 7 shows same projection showed at Figure 4, but within a budget-restriction of R$ 25 million by year for the entire network (18 airports). Due to budget restriction, airfields had to be ranked to proceed Section prioritizing. In this case, it is proposed a M&R intervention on

the runway Branch of the airfield showed in Figure 3 by the year of 2031, which is estimated to cost R$ 25,4 million.

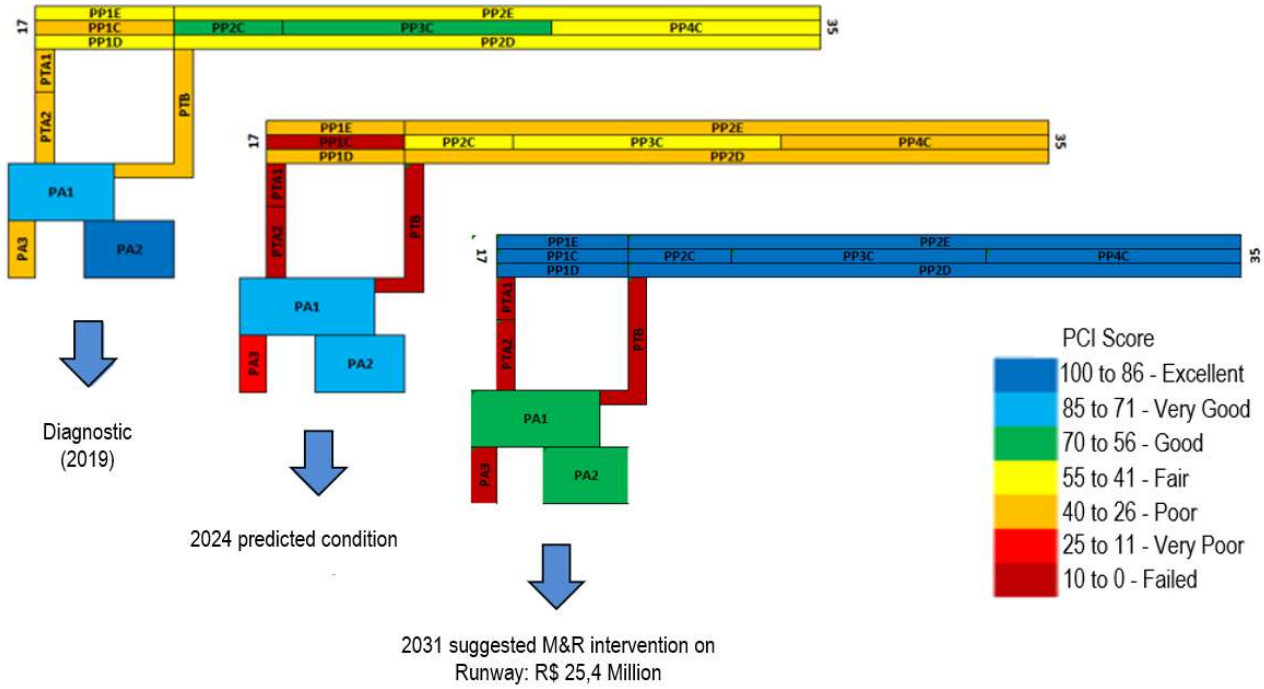


Figure 7. Projections of PCI performance within a budget-restriction scenario.

It is noticed that other Sections of the presented airfield continue to have deteriorated conditions (very poor to failed Sections). This is due to insufficient resources to a holistic M&R intervention and prior prioritized intervention in other airfields. It is also noted a late-M&R intervention, with deteriorated condition already by 2024. This is caused by the same explanation presented before.

Figure 8 shows PCI-based indicators for the whole pavement inventory within the yearly budget-restriction scenario.

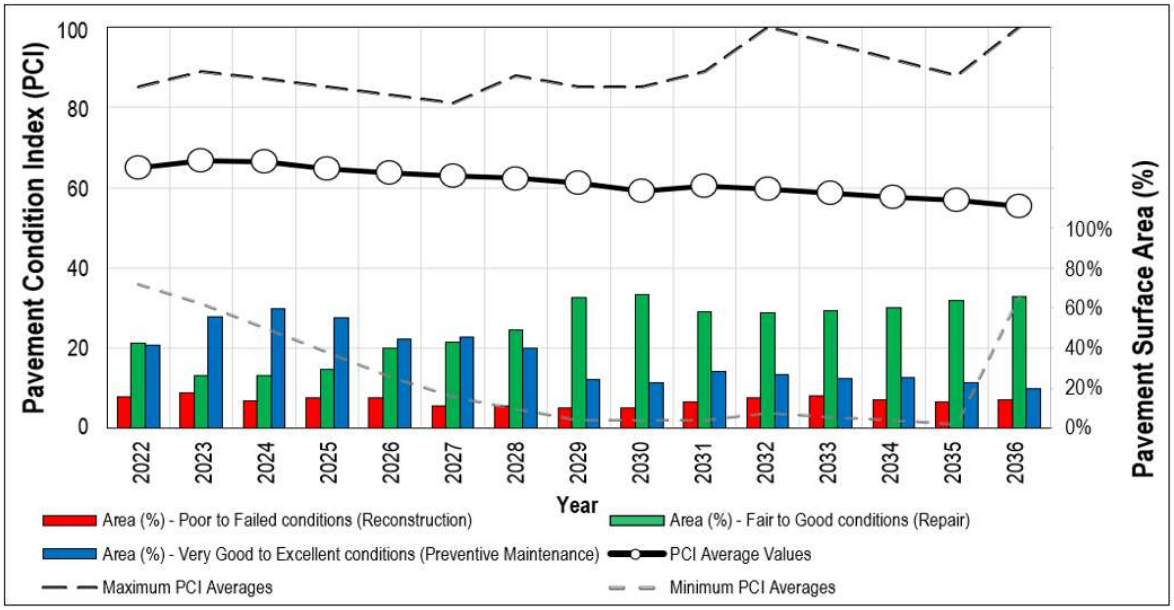


Figure 8. PCI-based indicators for pavement inventory on budget-restriction scenario.

The PCI-based indicators presented at this scenario show a better prognostic than scenario 1, with PCI average values of the whole network swinging by 60 (good conditions) during the horizon time and showing stable reconstruction needs. However, besides being steady, the overall indicators show no improvement of actual conditions (diagnostic) and deterioration

of some indicators, as Minimum PCI Averages and decreasing of Preventive Maintenance needs. It also shows a persistent increase of repair needs (63% by 2036). In other words, this scenario switches approximately 20% of conservation needs to repair needs, not changing percentage of reconstruction needs, pointing to worst conditions than present diagnostic.

Figure 9 shows costs estimated within this scenario between 2022 and 2036. In terms of present values, the total amount implemented on M&R solution over the presented years is equivalent to R$ 237 million. This value is significantly inferior than only applying M&R services by the last year, 2036 (R$ 632 million as showed in Scenario 1).

This cost analyses also show that budget planning must follow up with inflation predictions, at least for inflation corrections and monetary conservation of M&R services. That is due to decrease in quantities of services implemented by the same amount of monetary value in future years, as shown in Figure 9.

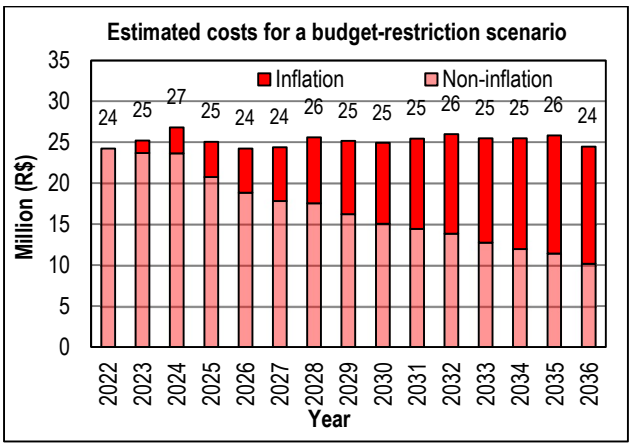


Figure 9. Estimated costs for scenario where about R$ 25 million per year is considered as limit for the entire pavement inventory

3.3. Scenario 3 – Ideal PCI performance

Figure 10 shows same projections as showed at Figure 4, but within an ideal performance scenario where no budget restriction is applied. The only limitation considered at this scenario is the need for airfield availability within same State areas, so no simultaneous intervention is chosen at these locations. The same approach as showed before for PCI-based indicators is show in this scenario at Figure 11.

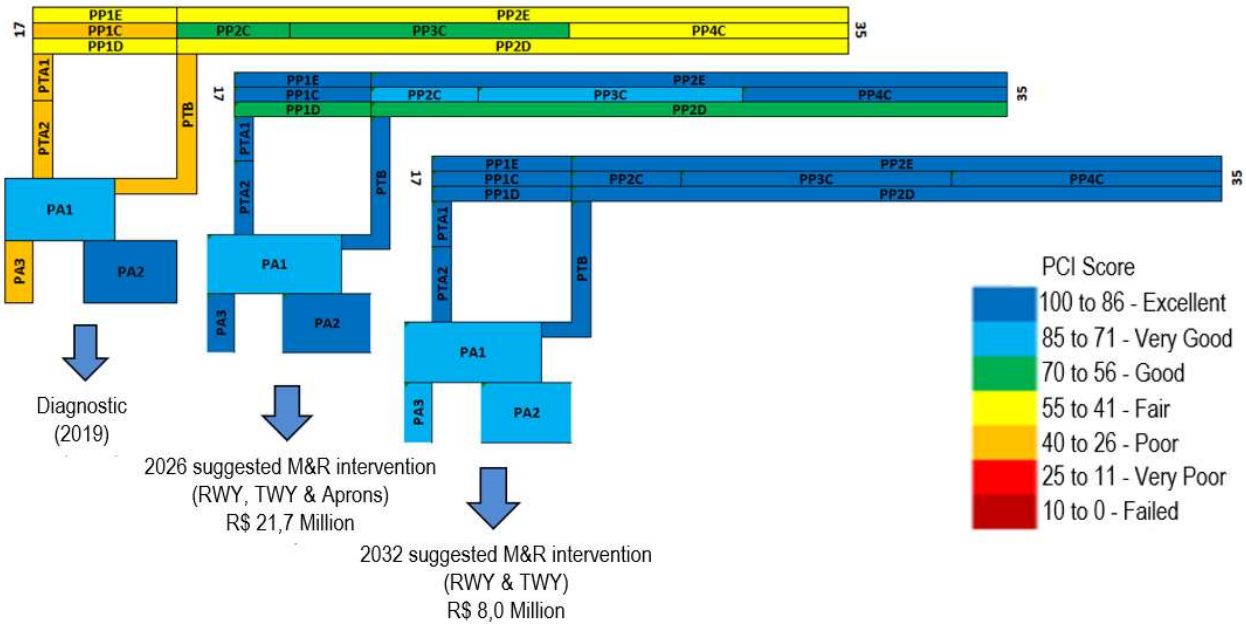


Figure 10. Projection of PCI performance as well as value of M&R services for evaluated airfield.

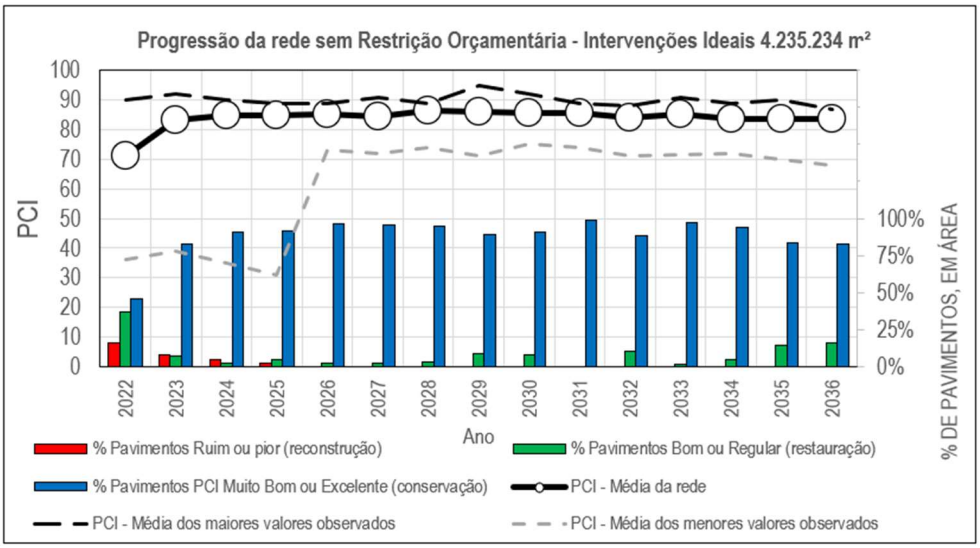


Figure 11. PCI-based indicators performance prediction on a ideal-performance with no budget restriction scenario.

Considering the PCI-based indicators, this scenario shows substantial better prognostic. PCI averages increase between 2022 and 2024, as showed by great increase of Preventive Maintenance over Repair and Reconstruction needs.

It is also noted similar values between maximum average and main average, which indicates a better consistency and convergence for overall conditions at very good to excellent levels.

The late increase of Minimum PCI Average values is due to the prior stated restriction, where some airfields located in same States must not be unavailable (*i.e.* execution of construction works at same time), aiming minimal network availability. Figure 12 shows estimated costs over the years within this scenario.

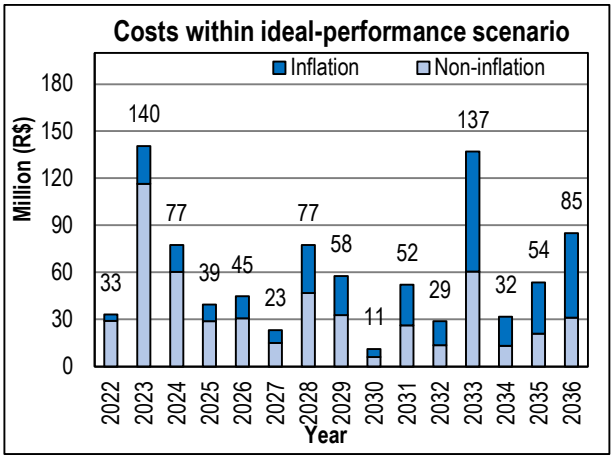


Figure 12. Estimated costs on a no-budget-restriction scenario.

It is noticed a significant budget need within first three years of estimated costs analyses. The year of 2022 is the first year of analysis, thus is assumed as year for intervention planning, project development, bidding, and execution of construction works. So, the estimated cost for that year is only for ongoing projects and construction plans in prior years. The considerable budget need afterwards is due to great repairs needed at diagnostic year, which also indicates some reconstruction needs. It is noted that while performing extensive services over first years, and therefore requiring considerable budget, M&R needs decrease after that period and tend to stabilize, as viewed on no-inflated values.

The estimated cost in this scenario sums up R$ 565 million (2022 values) of M&R services. This case demonstrates financially worthwhile when compared with intervention only at last year (2036), as shown in scenario 1, where a R$ 632 million would be required. In addition to that, this scenario performs better than scenario 2 under PCI-based indicators, as well as implying on greater availability levels for airfield pavement infrastructures.

4. CONCLUSION

PCI evaluations performed between 2018 and 2021 over 18 airfields were conducted as an engineering assessment method on a Pavement Management Program within the Brazilian Air Force. Results were gathered on a database of pavement surface

conditions and associated with PCI prediction models, M&R services decision premises, estimated costs of M&R techniques, as well as other discussed propositions.

Scenarios were created between do-nothing, budget restriction of R$ 25 million per year for the whole pavement inventory, and ideal performance of PCI-based indicators under no-budget restriction.

A do-nothing scenario revealed accumulated costs of R$ 1.6 billion by 2036 on deferred M&R services, while the value proposed as budget restriction performed as insufficient for the evaluated pavement inventory. The ideal performance revealed great needs for M&R services within next three years (2023 – 2025), but significant reduction afterwards.

Although presented methods and premises do not aim to predict project level interventions and precise budget allocation needs, results were sufficient to better aim M&R needs within a network level of analysis. The suggested approach also shows significant benefits for preventive maintenance over late interventions, meeting similar results found in literature (Shahin, 2005; Cordovil, 2010; Henrique & Motta, 2013; Batista, 2015). The benefits are observed not only on financial terms, but also on PCI performance and infrastructure availability, as shown in comparisons conducted between scenarios. This paper also achieves another objective of reaching decision-makers and enhancing the pavement management culture in an organizational manner.

It is expected that ongoing collection of structural data, as surface deflections, measured by the Falling Weight Deflectometer and pavement sample extractions, as well as future collection of friction and texture data, will enhance the proposed methods and make the suggested PMP more holistic. Therefore, it is expected that a structured PMP will drive decisions to more efficiency of public-budget needs.

5. REFERENCES

ASTM. (2020). D5340-20 *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys. West Conshohocken.* American Society of Testing Materials.

ANAC (2017). *Agência Nacional de Aviação Civil. Manual de Sistema de Gerência de Pavimentos Aeroportuários - SPGA. Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária*.

ANAC (2021). *Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro de Aviação Civil* – RBAC n° 154: *Projeto de Aeródromos*.

Batista, N. A. (2015). *Uma Proposta para Sistema de Gerência de Pavimentos Aplicada a Aeroportos Militares. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia* – IME.

Bernucci, L. B., Motta, L. M G., Ceratti, J. A. P e Soares, J. B. (2022). *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. 2nd Edition. Petrobras, Rio de Janeiro.

Brasil. (2013). *Decreto Federal* nº 7.983, de 8 de abril de 2013. Sets rules and criterion for budget creation within construction and engineered services contracted within public funds, and other measures. Planalto.

Cordovil, R. M. (2010). *Um Programa de Gerência de Pavimentos para o Comando da Aeronáutica - Estudo de caso: Bases Aéreas da Região Sul*. Master's Dissertetation. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS.

DIRINFRA (2022). Diretoria de Infraestrutura da Aeronáutica. *Relatório Técnico* nº 02/EPGA/2022 – Relatório *Anual de Gerência de Pavimentos de Aeroportos Militares*. Available by authors upon request. São Paulo, SP.

FAA. (2014). Federal Aviation Administration Airport Pavement Management Program (PMP). Advisory Circular 150/5380-7B. US Department of Transportation, Washington, DC.

FGV (2021). Fundação Getúlio Vargas. Série histórica do Índice Nacional de Custo da Construção Mensal– INCC – M. Obtido em: https://extra-ibre.fgv.br/IBRE/sitefgvdados/consulta.aspx, acessado em dezembro de 2021.

Haas, R., Hudson, W. R. e Zaniewski, J. (1994). Modern Pavement Management. Krieger, FL, United States.

Henrique, Y. F. e Motta, L. M. G. (2013) *Método de Avaliação de Pavimentos Aeroportuários – Aplicação a um Aeródromo Militar. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET. XXVI Congress*. Belém, PA.

Shahin, M. Y. (2005) Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots. 2nd Edition. Springer.

TCU. (2013). Tribunal de Contas da União. *Acórdão nº 2.622/2013 – Plenário*.

A GRAPHICAL ANALYSIS OF AIR TRAVEL DEMAND AND SOCIAL DEVELOPMENT: THE ROLE OF FINANCIAL INCLUSION

Luca J. Santos*, Alessandro V. M. Oliveira
Aeronautics Institute of Technology, Center For Airline Economics

* **Corresponding author e-mail adress:** lucaljs@ita.br

PAPER ID: SIT200

ABSTRACT

Although the airline industry presents similar operational and management strategies worldwide, there might be particular characteristics among developed and developing economies that might impact demand accordingly. In this paper, the objective is to gather evidence that social development indicators might explain the development of air transportation services in emerging economies while specifically investigating the role of financial inclusion. Our results suggest that financial inclusion may not be associated to more passengers in High Income and in Low Income countries. However, the evolution of financial access could represent an indicator to increase demand in Upper Middle Income, Middle Income and Lower Middle Income countries. Therefore, financial inclusion may represent a dimension to be further explored in the literature of the determinants of air travel demand in developing economies. Further statistical analysis are required to corroborate our results.

Keywords: Air travel demand, Financial inclusion, Middle income economies.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Finance Code 001; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Code 2020-06851; and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Code 305439/2021-9.

1. INTRODUCTION

Although the airline industry presents similar operational and management strategies worldwide, there might be particular characteristics among developed and developing economies that could impact demand accordingly. Country-specific levels of socioeconomic development and inhabitants capabilities are able to leverage or inhibit demand, i.e., the income-elasticity of air travel demand present different values among these economies: it is more accentuated in emerging than in developed economies.

According to the World Bank, "financial inclusion is a key enabler to reducing poverty and boosting prosperity" as it presents a dimension of population capabilities to access financial services such as transaction accounts, borrowings and financing (Demirguc-Kunt et al., 2018). Accessing financial services could facilitate day-to-day living, and helps people to plan for both long-term goals and unexpected events. As accountholders, it is expected that people may use other financial products, such as credit and insurance, which can improve the overall quality of life. Recently, engaging with digital financial inclusion represents another key characteristic of population capabilities to deal with digital payments and digital financial services (Arner et al., 2020).

In this paper, we specifically cover the role of financial inclusion as a social development indicator to investigate its relationship with the air travel demand, considering different income-level groups of countries. In fact, the world has seen an increase from 51% to 69% of banked adults from 2011 until 2017 (Demirguc-Kunt et al., 2018). The objective is to gather evidence that social development indicators might explain the development of air transportation services in emerging economies. Therefore, we explain that the dynamic of air travel demand is defined according to the income-level and there might be particularities of each income group that drive its growth. Our contribution rely on investigating a complementary dimension of social development as driver of air travel demand, other than focusing our analysis on the usual income and airfares as drivers.

Besides this introduction, the study is presented as follows: Section 2. presents similar studies that have already been done. Section 3. details the methodology proposed. Section 4. shows the results and the discussion. Finally, Section 5. pinpoints the main conclusions.

2. BACKGROUND

This section presents main empirical findings on the determinants of air travel demand. Due to the more mature aspect of airline market in developed economies, we substantially focus on the evidences from emerging economies, where social development is expected to arise and possibly impact air travel consumption. Besides that, the academy has also showed interest on better understanding the forces that drive air travel demand on these under development markets (Njoya & Knowles, 2020).

The literature shows that air travel demand possesses many drivers. The most traditional are income and airfares (or at least proxies for both) as explained by the consolidated consumer theory. Empirical evidences appear in the studies of both Valdes (2015) and Hakim & Merkert (2019) which investigate the determinants of air transport in emerging markets. The former study analyze a panel data of 32 middle-income countries and state that income is the main driver, what is corroborated by the latter that presents similar results while analyzing South Asian low-income countries. Open Skies Agreement and low-cost carriers penetration also play an important role in inducing demand on those markets.

Although the air travel demand is a high interest research topic due to the amount of literature available, Becken & Carmignani (2020) noted that pre-pandemic projections of demand could be unrealistic. In their study, they brought the environmental discuss to deny optimistic forecasts made by the industry and to propose a model accounting for emissions and economic changes. From their work we absorb the motivation to keep investigating the dynamics of air travel demand.

Adey et al. (2007) defended that new studies in the air transportation field should adopt the social perspective, what has been reinforced by Falcão et al. (2021). They said it would be a

fundamental piece for studies considering a transportation mode that classifies itself as a globalization inductor. By taking their perspective, Frazão & Oliveira (2020) identify a positive correlation between reducing income inequality and air travel demand in Brazil. They also provide evidence that an emerging middle-class in the country is associated with a higher price-elasticity of air travel consumption. Evidences of middle-class airline tickets consumption behavior are also provided by Carvalho et al. (2020) whose study demonstrates that access to credit is an indicator that should be included in air travel demand modelling in emerging economies.

Some studies also investigate the role of the Human Development Index (HDI), which is a wide accepted indicator of a country socioeconomic development. İnan et al. (2021) and Santos et al. (2021) provide contrasting evidences of the existing relationship between this index and air travel demand. While the former findings' show a negative correlation, the latter's show positive results, which indicates that better quality of life associated to better economic conditions would be an inductor of passengers. Such results suggest that the relationship between social development and air travel demand may not be similar throughout the world.

The role of financial inclusion in boosting or inhibiting air travel demand is less explore in the extant literature, although Santos et al. (2021) presented an empirical assessment by a two-step econometric approach and panel data to investigate the problem. Their results show a significant influence of financial inclusion over the air travel demand in Brazil in the 2010s. Specifically, the authors investigated the role of access to credit and the opposite effect caused by the adjacent household indebtedness, what economists call the *boom and bust* effect over consumption. In the context of financial inclusion metrics, such study considered variables close to monetary values such as credit, financing and household debt.

3. RESEARCH DESIGN

We employ a graphical analysis to accopmplish the objetive proposed of gathering evidence of the role of financial inclusion to explain air travel demand in emerging economies. We consider the evolution of financial inclusion indicators and the evolution of air travel demand to plot figures and then analyze the results. By doing so, we are able to visually observe differences in the role of financial inclusion among groups of countries that present distinct income level. Subsection 3.1. describes the database and subsection 3.2. provides further details about the analysis.

3.1. Data description

In this paper, we use the World Development Indicators (WDI) database, which is publicly provided by the World Bank Group (WBG) (World Bank, 2021). They explain that WDI database is "the World Bank's premier compilation of cross-country comparable data on development", presenting more than 1,400 socioeconomic and development indicators for 217 economies and more than 40 country groups [1]. The WDI database offers quality data regarding 6 dimensions of development: poverty and inequality; people; environment; economy; states and markets; and global links. Most of the data are available annually since the 1960s, but there are series that have started to be monitored recently. For instance, the financial inclusion indicators are available for just three years: 2011, 2014, and 2017.

As an initial attempt to achieve the proposed objective, our study considers the data regarding the groups of countries classified by income level. It means that our data refers to six classes of countries: High Income; Upper Middle Income; Middle Income; Lower Middle Income; Low & Middle Income; and Low Income. By doing that, we lose the granularity of the data that is available in the country-level but we are able to investigate our main topic of interest: differences among developed and developing countries considering their income level.

[1] The World Bank, available at https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/

3.2. Graphics description

We observe historical compound annual growth rates (CAGR) of financial inclusion variables to generate our figures and plot them in the X-axis – they represent our instruments of social development. The Y-axis present the historical CAGRs of air travel demand. Since data are available for three time periods, we adopted observations from 2011 (initial value) and 2017 (final value) to calculate the CAGR for both air travel demand and financial inclusion indicators as presented by Equation 1, where N denotes the time interval between initial and final periods ($N = 2017 - 2011 = 6$). The indicators considered for the study are presented in Table 1.

$$CAGR = \left(\frac{Final\ Value}{Initial\ Value} \right)^{\frac{1}{N}} - 1 \qquad (1)$$

We use the volume of air passengers as our variable of air travel demand, but we encourage future research to consider ATMs (aircraft total movements) as well – they are also available in the same database. Our analysis consider four dimensions of financial inclusion as social development indicators. These indicators are related to the capability of inhabitants to access the financial system but they do not account for the availability of financial products, such as borrowings and financing – as in Santos et al. (2021).

Therefore, four figures are presented considering CAGRs of financial inclusion indicators and air travel demand. We consider groups of countries according to their income level classified by the World Bank in the WDI database. Considering distinct income groups allows us to differentiate the dynamics between richer and poorer countries, which is our proxy to infer about the development level of a country. We use neither the GDP nor the GDP per capita because it was easier to use the original classification on income provided by the original database.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The current section presents the results. Figure 1 shows the relationship between the evolution of the share of the population aged 15 or more that owns an account at a financial institution or with a mobile-money service provider (MMSP) and the evolution of air travel demand. The figure suggests that the air travel demand have increased more in Upper Middle Income countries, even though financial inclusion evolution were higher in Low Income countries. It is possible to suggest that financial inclusion in Upper Middle Income, Middle Income and Lower Middle Income countries may have a higher probability to be correlated with air travel demand. On the other hand, in Higher Income and in Low Income countries there is a lower probability of observing correlations between these phenomena.

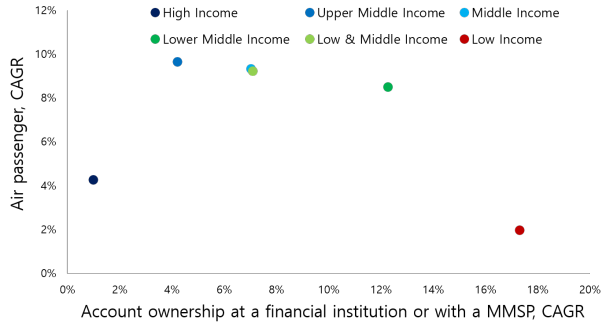


Figure 1 Account ownership at a financial institution or with a MMSP.

Figure 2 shows the relationship between the evolution of the number of Automated teller machines (ATMs) per 100,000 adults and the evolution of air travel demand. Results suggest that ATMs actually decreased in High Income countries what is suggestive of more digitalisation of financial services. Again, Low Income countries form the group of countries with more financial inclusion. Upper Middle Income and Middle Income countries present similar results. In Figure 3, we consider the evolution of borrowers from commercial banks in the X-axis -- data of High Income and Low Income countries are missing. The figure suggests that Upper Middle Income, Middle Income and Low & Middle Income countries have similar characteristics. Differently from whats is observed in Figures 1 and 2, Lower Middle Income countries presented lower evolution of financial inclusion compared to Upper Middle Income and Middle Income countries. This is suggestive that Lower Middle Income countries have received financial services infrastructure but the penetration of financial services has not been too expressive as in other income groups. This is also observed and corroborated by Figure 4.

Table 1 Variables description

Air transport	**Dimesion**
Air transport demand	# of passengers carried
Financial inclusion	**Dimesion**
Account ownership at a financial institution or with a MMSP	% of population aged 15+
Automated teller machines (ATMs)	# per 100,000 adults
Borrowers from commercial banks	# per 1,000 adults
Commercial bank branches	# per 100,000 adults

Note: MMSP stands for *mobile-money service provider*.

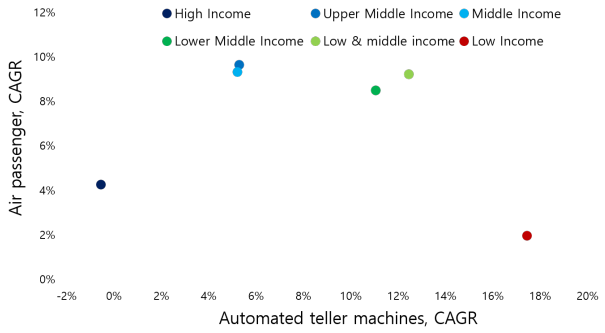


Figure 2 Automated teller machines.

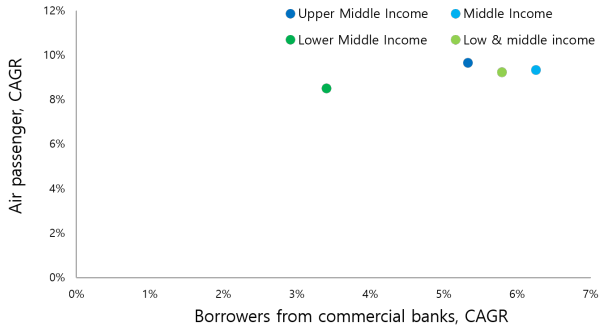


Figure 3 Borrowers from commercial banks.

In Figure 4, we present the relationship between the evolution of the number of commercial bank branches per 100,000 adults and the evolution of air travel demand. Again, negative CAGR of this indicator in High Income and Upper Middle Income countries might be associated to digital financial inclusion. From Figure 4 we understand that the evolution of commercial bank branches in Upper Middle Income and in Middle Income countries may have not increased air passengers as its evolution is close to 0%. Also, we note that this indicator have icnreased more in Lower Middle Income than in Low Income countries, but it is not possible to say that it has a direct positive correlation with air passengers. By the way, we state that the much more pronounced evolution of passengers in Lower Middle Income compared to Low Income countries should be a result of higher income instead of financial inclusion measured by commercial bank branches.

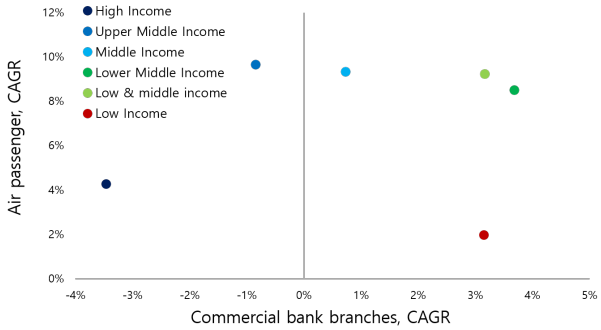


Figure 4 Commercial bank branches.

Based on the results, we note that higher levels of financial inclusion in Low Income countries were not enough to boost air travel demand, suggesting that the industry may not rise from the expansion of financial infrastructure and services. However, if the income level increases, we observe that moderate levels of financial inclusion in Lower Middle Income, Middle Income, and Upper Middle Income countries may be associated with higher air travel demand. Finally, we observe that financial inclusion does not present much evidence to be able to leverage air travel demand in High Income countries. This support our hypotheses that the air travel demand do present different behavior among developed and developing economies and financial inclusion might be a dimension able to explain this consumption behavior in emerging markets.

5. CONCLUSIONS

In this paper, we present an evaluation of the relationship between financial inclusion and air travel demand while considering aggregate data from distinct income-level groups of countries. Our contribution regards in presenting an assessment of a social development dimension that may impact air travel consumption in emerging economies, shedding a light on the role of financial inclusion. Results suggest that financial inclusion may not be associated to more passengers in High Income and in Low Income countries. However, the evolution of financial access could represent an indicator to induce more demand in Upper Middle Income, Middle Income and Lower Middle Income countries. Future research could provide further investigations to improve statistical robustness of evidences gathered in the study. We also encourage other sources of air transportation data to be used and more investigations considering the topic of digital financial inclusion and air transportation.

References

Adey, P., Budd, L. & Hubbard, P. (2007). Flying lessons: exploring the social and cultural geographies of global air travel, Progress in Human Geography 31(6), 773–791.

Arner, D. W., Buckley, R. P., Zetzsche, D. A. & Veidt, R. (2020). Sustainability, fintech and financial inclusion, European Business Organization Law Review 21(1), 7–35.

Becken, S. & Carmignani, F. (2020). Are the current expectations for growing air travel demand realistic?, Annals of Tourism Research 80, 102840.

Carvalho, M. C. T., Oliveira, B. F. & Oliveira, A. V. M. (2020). Estudo econométrico dos efeitos da disponibilidade de crédito na demanda por transporte aéreo no brasil, TRANSPORTES 28(5), 43–56.

Demirguc-Kunt, A., Klapper, L., Singer, D. & Ansar, S. (2018). The Global Findex Database 2017: Measuring financial inclusion and the fintech revolution, World Bank Publications,.

Falcão, V. A., Silva, F. G. F., Oliveira, F. H. L., Negri, N. A. R., Andrade, M. O., Brasileiro, A., Eller, R. d. A. G. & Macário, R. (2021). Scientific investigations in air transport about brazil: A bibliometric review, Case Studies on Transport Policy 9(4), 1912–1921.

Frazão, J. A. F. & Oliveira, A. V. (2020). Distribuição de renda e demanda por transporte aéreo: uma especificação de modelo econométrico para o mercado doméstico brasileiro, TRANSPORTES 28(3), 1–13.

Hakim, M. M. & Merkert, R. (2019). Econometric evidence on the determinants of air transport in south asian countries, Transport Policy 83, 120–126.

İnan, A., Tolga, T. & Gökmen, R. (2021). The determination of the factors affecting air transportation passenger numbers, International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace 8(1), 4.

Njoya, E. T. & Knowles, R. D. (2020). Introduction to the special issue: Air transport in the global south, Journal of Transport Geography 87, 102814.

Santos, L. J., Oliveira, A. V. M. & Aldrighi, D. M. (2021). Testing the differentiated impact of the covid-19 pandemic on air travel demand considering social inclusion, Journal of Air Transport Management 94, 102082.

Valdes, V. (2015). Determinants of air travel demand in middle income countries, Journal of Air Transport Management 42, 75–84.

World Bank (2021). World development indicators database. Washington, DC, USA: The World Bank Group.

AN EMPIRICAL STUDY ABOUT MORAL DAMAGES AND RULING 210 FROM THE BRAZILIAN SUPREME COURT IN PASSENGERS' RIGHTS: THE NEED FOR A CLEAR PUBLIC POLICY

José Gabriel Assis de Almeida, João Marcelo Sant'Anna Costa, Lydia de Freitas Vianna
UNIRIO Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro and UERJ Universidade do Estado do Rio de Janeiro

*** Corresponding author e-mail address**: jgaa@aaalaw.com.br

PAPER ID: SIT222

ABSTRACT

Este trabalho é resultado de uma pesquisa empírica sobre os danos morais e o Tema 210, publicado em novembro de 2017, pelo Supremo Tribunal Federal sobre a aplicação da Convenção de Montreal de 1999 versus o Código do Consumidor Brasileiro. No julgamento que ensejou tal Tema, o Supremo Tribunal Federal declarou que os danos morais não seriam limitados pela Convenção de Montreal, uma vez que a Constituição da República determina que tais danos devem ser integralmente indenizados. A hipótese de pesquisa é que, em termos práticos, embora os danos morais tenham sido deixados fora dos limites da Convenção de Montreal, o valor atribuído pelos tribunais brasileiros por tais danos não excede substancialmente nem frequentemente os valores previstos na Convenção de Montreal. Para garantir que a pesquisa empírica não fosse influenciada por fatores externos, a hipótese foi testada por meio da análise direta e empírica de todas as decisões proferidas por tribunais brasileiros (de qualquer estado brasileiro) em processos movidos contra uma única companhia aérea internacional, que operava apenas um voo por dia, sempre do mesmo aeroporto e para o mesmo destino, no período de 2013 a 2022. Foram encontradas 584 decisões, representando todas as decisões que foram proferidas em todos os processos envolvendo tal companhia aérea. Já tendo analisado todas as 290 decisões de indenização por danos morais, os resultados mostram que em apenas 42 casos (13 por atraso de voo e 29 relativos a bagagem) a indenização por dano moral foi concedida em nível superior aos limites da Convenção de Montreal. A conclusão é que, em termos práticos e levando em consideração a globalidade das ações judiciais envolvendo as companhias aéreas, o fato do Tema 210 ter deixado de lado o dano moral, a situação não agravou o risco das companhias aéreas, uma vez que a indenização por dano moral costuma ser concedida dentro dos limites da Convenção de Montreal. No entanto, deve-se destacar que, quanto à bagagem, os 32 casos em que os danos morais foram concedidos em nível superior ao estabelecido na Convenção de Montreal representam 59% de todos os casos, o que é um valor substancial e indica que os limites da Convenção de Montreal, se aplicada aos danos morais, teria impacto de reduzir o montante das indenizações.

Keywords: Aviação, Convenção de Montreal, Tema 210, Danos Morais, Passageiros

1. INTRODUÇÃO

Em novembro de 2017, o Supremo Tribunal Federal, em sede do Recurso Extraordinário o nº 636331-RJ e do Agravo em Recurso Extraordinário nº 766618 / SP, adotou o Tema 210 da sua Repercussão Geral, com o seguinte teor: "Nos termos do art. 178 da Constituição da República, as normas e os tratados internacionais limitadores da responsabilidade das transportadoras aéreas de passageiros, especialmente as Convenções de Varsóvia e Montreal, têm prevalência em relação ao Código de Defesa do Consumidor."

Em virtude do mecanismo de Repercussão Geral, este Tema 210 tornou-se obrigatório para todos os demais tribunais brasileiros que não podem mais aplicar o Código de Defesa do Consumidor, em detrimento das convenções internacionais, nos casos de responsabilidade civil de companhias aéreas por danos a passageiros, bagagem ou carga.

No entanto, ao definir o Tema 210, o Supremo Tribunal Federal expressamente declarou que os danos morais não estão sujeitos aos limites indenizatórios fixados nas convenções internacionais, nomeadamente na de Montreal e na de Varsóvia.

O fundamento apontado pelo Supremo Tribunal Federal para a não aplicação dos limites indenizatórios aos danos morais é o fato da Constituição da República, no art. 5º, incisos V e X, estabelecer que a reparação do dano moral deve ser ampla.

Nesse sentido, veja-se o seguinte trecho do acórdão (voto do Min. Gilmar Mendes), a propósito da Convenção de Varsóvia: "O segundo aspecto a destacar é que a limitação imposta pelos acordos internacionais alcança tão somente a indenização por dano material, e não a reparação por dano moral. A exclusão justifica-se, porque a disposição do art. 22 não faz qualquer referência à reparação por dano moral, e também porque a imposição de limites quantitativos preestabelecidos não parece condizente com a própria natureza do bem jurídico tutelado, nos casos de reparação por dano moral"

Logo a seguir, o Min. Marco Aurélio, no seu voto, frisou: "Porque tem-se, no Tribunal, precedente de 1996, da Segunda Turma, e foi unânime, após pedido de vista do ministro Francisco Rezek, no sentido de assentar que, no caso, prevalece, sob o ângulo dos danos morais, a Constituição Federal.".

Este assunto foi reiterado no (voto do Min. Lewandowski: "A meu ver, como corretamente assentado, tanto pelo Ministro Barroso, como pelo Ministro Gilmar e o Ministro Marco Aurélio, não está em causa aqui a condenação dos danos morais, até porque o Tribunal tem posição no sentido de cindir essas duas questões. O Ministro Marco Aurélio foi o Relator de um acórdão, como Sua Excelência revelou, aprovado por unanimidade na Segunda Turma, em que disse o seguinte - Vossa Excelência me corrija se eu estiver errado: que, com relação aos danos materiais, aplica-se sim a Convenção de Varsóvia. Mas, tendo em conta as disposições da Constituição, no que tange a proteção do consumidor, se houver dano moral, nesse aspecto aplica-se inteiramente o Código do Consumidor, que se encontra inclusive fundado, arrimado na Constituição Federal."

De fato, em acórdão anterior, proferido em 1996 no RE nº 172720, o Supremo Tribunal Federal já havia declarado que, em matéria de danos morais, não se podia aplicar as convenções internacionais, pois tal aplicação – ao impor uma limitação indenizatória – violaria este preceito constitucional.

O propósito da pesquisa cujas conclusões são apresentadas neste artigo partiu da hipótese que, apesar dos limites indenizatórios das convenções internacionais, sejam elas a de Varsóvia ou a de Montreal não se aplicarem aos danos morais, o montante das indenizações concedidas pelos tribunais brasileiros a título destes danos não excede, nem substancialmente, nem frequentemente, os valores previstos na Convenção de Montreal.

O objeto específico deste estudo são, exclusivamente, as indenizações por danos morais, sejam elas causadas por atraso de voo ou extravio de bagagens. Os danos materiais não são objeto deste estudo

Apesar de existir literatura diversa sobre dano moral e transporte aéreo, não existe literatura específica sobre o tema abordado neste artigo, pois não há nenhum outro estudo

empírico sobre o impacto do Tema 210 da Repercussão Geral do Supremo Tribunal Federal sobre as indenizações por danos morais.

2. METODOLOGIA

Para testar a hipótese da pesquisa não era possível fazer uma coleta randômica de acórdãos proferidos pelos diferentes tribunais brasileiros, sob pena do resultado útil da pesquisa ficar comprometido.

Com efeito, pelo lado do limite temporal, a pesquisa tinha de abranger decisões proferidas antes e depois da adoção do Tema 210, ou seja, antes e depois de novembro de 2017, para permitir, por um lado, verificar se antes da adoção do Tema 210 as indenizações por danos morais já excediam os limites indenizatórios convencionais e, por outro lado, para constatar se após novembro de 2017, o valor dessas indenizações aumentou.

Era, também, importante evitar que o resultado da pesquisa pudesse ser indevidamente influenciado por fatores externos. Assim, se a pesquisa tivesse por objeto decisões proferidas em relação a qualquer companhia aérea, o resultado poderia ser influenciado por diferenças no tratamento concedido por cada companhia aérea aos seus respectivos passageiros. Dito de outra forma, cada companhia aérea tem os seus procedimentos e a sua política no atendimento às demandas de passageiros e cada companhia aérea tem um determinado padrão de qualidade de serviço. Assim, poderia ser que o valor das indenizações por danos morais variasse em razão do tipo de serviço oferecido, tornando o resultado da pesquisa pouco confiável.

Era, ainda, importante que o resultado da pesquisa não fosse influenciado pelas diferenças entre os variados voos de uma companhia aérea. Com efeito, no transporte aéreo internacional há voos mais curtos, por exemplo para a Argentina e o Uruguay e voos muito mais longos, como é o caso daqueles que têm por destino os países asiáticos. É intuitivo que um magistrado se sinta inclinado a conceder uma indenização por danos moral em caso de um voo mais longo do que no caso de um voo que tenha uma duração pouco maior do que duas ou três horas.

Por fim, era preciso evitar que o resultado da pesquisa fosse influenciado pela postura de um determinado tribunal. Deste modo, a pesquisa não poderia se concentrar em apenas no Tribunal de Justiça de um ou outro Estado brasileiro. Era importante, para assegurar a representatividade dos resultados, que as decisões viessem de Tribunais de Justiça de variados Estados.

Em consequência, os limites da pesquisa foram definidos como sendo todas as decisões proferidas por qualquer tribunal brasileiro contra uma única companhia aérea, que operasse um único voo, com o mesmo ponto de origem de destino (ainda que fossem admitidas etapas anteriores ou posteriores para a viagem).

A companhia aérea Etihad Airways, que operou, entre 2013 e 2017 um voo diário entre São Paulo – aeroporto de Guarulhos – e Abu Dhabi foi a escolhida. Note-se, contudo, que após o fim das operações desta companhia aérea no Brasil, vários processos foram iniciados sem que estivessem em causa voos realizados a partir do Brasil ou para o Brasil, mas sim voos realizados no exterior, no qual uma das pernas foi operada por esta companhia aérea

Tendo em vista a extensão da planilha na qual os dados foram compilados, não foi possível anexá-la a este artigo. Porém, uma cópia dela pode ser solicitada através do endereço email dos autores.

3. RESULTADOS

A pesquisa localizou 584 processos judiciais, que tramitaram nos Tribunais de Justiça de 24 Estados brasileiros, entre agosto de 2013 e julho de 2022.

Em 290 destes processos houve condenação em danos morais.

Em nenhum destes casos estava em causa morte ou lesão de passageiros, motivo pelo qual é possível afastar da pesquisa os valores indenizatórios previstos no art. 21 da Convenção de Montreal. Resta, então, analisar os casos de atraso de voo e os de extravio, avaria ou atraso de bagagem.

Nos termos do art. 22 (1) da Convenção de Montreal, a indenização por atraso de voo é limitada a 4.150 DES por passageiros.

Este valor correspondia, em 01 de novembro de 2017 a R$ 19.085,43, conforme tabela de conversão do site do Banco Central do Brasil (https://www.bcb.gov.br/conversao).

É claro que entre agosto de 2013 e julho de 2022, houve variação da paridade do DES para a moeda brasileira. No entanto, o grupo de pesquisa não tinha meios para fazer a conversão da condenação em moeda nacional de cada condenação, à data do julgamento, para DES.

Assim, resolveu-se adotar como parâmetro da conversão, o mês no qual ocorreu o julgamento do Tema 210 da Repercussão Geral.

Foram localizados 249 processos sobre atraso de voo (seja sob a modalidade de atraso propriamente dito, seja sob a forma de cancelamento de voo), com pedidos de dano material ou de dano moral ou de ambos. Em 181 desses 249 processos, foi possível localizar decisões judiciais deferindo pedidos de indenização por dano moral.

Em apenas 11 decisões, o valor da indenização por dano moral foi superior a R$ 19.085,43. Mais precisamente em 7 casos a indenização foi de R$ 20.000,00, em 2 casos foi de R$ 24.000,00, em 1 caso foi de R$ 25.425,00 e em 1 caso de R$ 34.518,00.

Quer isto indicar que, em 170 outras decisões por atraso de voo, a indenização concedida pelos tribunais brasileiros a título de danos morais ficou aquém do limite estabelecido na Convenção de Montreal.

Se for somada a condenação por danos materiais à condenação por dano moral, em apenas 13 casos o valor excede R$ 19.085,43. Isto significa que a soma da condenação por danos materiais com a condenação por danos morais acresce apenas 2 novos casos, um no qual a condenação por danos morais havia sido de R$ 12.000,00 e outro onde o valor da indenização por danos morais foi fixada em R$ 14.000,00.

A explicação para tal é que o valor das indenizações por danos materiais é relativamente baixo. Em apenas 6 casos, entre os 181, ele foi superior a R$ 4.000,00

Por outro lado, o art. 22 (2) da Convenção de Montreal estabelece a indenização por destruição, perda, avaria ou atraso em 1.000 DES, salvo se o passageiro tiver realizado declaração especial de valor e tiver pago uma quantia suplementar. Este valor correspondia, em 01 de novembro de 2017 a R$ 4.598,90, conforme tabela de conversão do site do Banco Central do Brasil (https://www.bcb.gov.br/conversao).

A pesquisa apontou 95 processos sobre destruição, perda, avaria ou atraso de bagagem. Em 54 destes processos houve decisão a conceder indenização por danos morais e, em 28 processos, essa indenização foi superior a R$ 4.598,90.

Essas condenações estão distribuídas conforme a tabela 1 abaixo

Tabela 1 – Processos de bagagem com indenização superior a R$ 4.598,90

Número de processos	*Valor da indenização*	*Número de autores por processo*
1	R$ 4.685,00	1
6	R$ 5.000,00	1
1	R$ 5.184,98	1
8	R$ 6.000,00	1
3	R$ 7.000,00	1 (salvo um processo onde houve 2 autores)
2	R$ 8.000,00	1
1	R$ 10.000,00	1
1	R$ 12.000,00	1
1	R$ 16.000,00	2
3	R$ 20.000,00	3
1	R$ 24.000,00	2

Se for somada a indenização por dano moral e a indenização por dano moral, há 32 processos de bagagem cuja condenação excede R$ 4.598,90. Isto é, a soma da condenação por danos materiais com a condenação por danos morais acresce apenas 1 novo caso.

4. CONCLUSÃO

A conclusão que é possível extrair dos resultados acima é que, na hipótese de atraso

de voo, é insignificante o número de casos nos quais a indenização por dano moral, sozinha ou combinada com a indenização por dano material, excede o valor previsto na Convenção de Montreal. Trata-se de 13 casos em um universo de 181 casos, ou seja, um pouco mais de 7% do total de casos.

Por outro lado, é bastante mais significativo o número de casos nos quais a indenização por dano moral, individualmente considerada ou em conjunto com a indenização por dano material, excede o valor indicado na Convenção de Montreal. São 32 casos em um universo de 54, o que representa 59%.

Esta discrepância entre as duas situações talvez se explique por alguns fatores.

O primeiro é que o valor da indenização por atraso previsto no art. 22 (1) da Convenção de Montreal é significativamente mais elevado que o valor definido para a destruição, perda, avaria ou atraso de bagagem.

O segundo é que a destruição, perda, avaria ou atraso de bagagem parece gerar, nos tribunais, a concessão de uma indenização por dano moral de valor mais elevado do que o atraso de voo. Com efeito, foram localizados apenas 8 casos de bagagem nos quais a indenização foi igual ou inferior a R$ 2.500,00, enquanto em 16 casos de atraso de voo a indenização foi igual ou inferior a R$ 2.500,00. Este resultado parece indicar que os tribunais consideram mais grave o extravio de bagagem que o atraso de voo. Dito de outra forma, parece que o atraso de voo é algo mais corriqueiro e esperado no transporte aéreo internacional do que o dano à bagagem e, portanto, justifica uma menor indenização.

Não obstante, esta disparidade é importante, pois afeta a razão de ser das convenções internacionais em matéria de transporte aéreo, ressaltada pelo Min. Luis Roberto Barroso no seu voto no Agravo em Recurso Extraordinário nº 766618 / SP: “A teleologia da regra é bastante clara: a ideia é uniformizar o direito aeronáutico, a fim de viabilizar e fomentar o transporte internacional. Como a atividade envolve necessariamente dois ou mais Estados soberanos, sua execução sempre se conecta, pelo menos, a duas ordens jurídicas diferentes. Sem a uniformização das normas aplicáveis, a insegurança jurídica seria enorme – inclusive para os passageiros, que só poderiam saber os seus direitos recorrendo a complexas regras de conexão e estudando a legislação estrangeira aplicável. Ademais, a harmonização das normas favorece a isonomia (CF/88, art. 5º), ao garantir que todos os consumidores recebam o mesmo tratamento por parte dos fornecedores – o que, aliás, é previsto no próprio CDC como direito básico do consumidor (art. 6º, II, in fine). Dessa forma, a opção consagrada no art. 178 prestigia, a um só tempo, a previsibilidade do Direito, a igualdade e os compromissos firmados pela República junto à comunidade internacional.”

Assim, é urgente discutir e estabelecer uma política pública para o transporte aéreo internacional no Brasil, nomeadamente no que toda aos valores indenizatórios, inclusive quanto ao dano moral.

5. CITAÇÕES

BRASIL. Supremo Tribunal Federal. Sessão Plenária. Recurso Extraordinário 636331 / RJ, rel. Min. Gilmar Mendes, julg. 25 mai. 2017.

BRASIL. Supremo Tribunal Federal. Sessão Plenária. Agravo em Recurso Extraordinário nº 766618 / SP, rel. Min Luis Roberto Barroso, julg. 25 mai. 2017.

BRASIL. Supremo Tribunal Federal. Segunda Turma. Recurso Extraordinário 172.720, rel. Min. Marco Aurélio, julg. 06 fev. 1996.

FRAMEWORK PARA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS EVTOL – REQUISITOS TÉCNICOS

Alfredo Almeida de Araujo, João Batista Camargo Jr., Lester de Abreu Faria
Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica

*** Corresponding author e-mail address**: alfredo.araujo@usp.br

PAPER ID: SIT228

ABSTRACT

This article aims to define the necessary requirements for the creation of a communication framework aimed at operating an autonomous navigation system for vertical landing and take-off aircraft, with electric motorization (eVTOL). This framework has the function of enabling the control, communication and navigation of the aircraft, so that it is possible to replace the management currently performed by the control towers existing in the aerial systems, with an autonomous control system. With the evolution of artificial intelligence technology and electric motorization, it will be possible to develop aircrafts with the specific objective of performing aerial mobility in large urban centers, becoming an alternative to the current means of transport. Specifically, as part of the navigation system, a compatibility of the systems currently used by satellite should occur, in order to meet the needs imposed by the application in question. In addition, due to the critical nature that this application imposes, it is suggested what adaptations the communication networks will need to have for a safe and available service. Therefore, electronic warfare techniques should be incorporated into the networks, creating countermeasures and electronic counter countermeasures to be used in case of attack.

Keywords: autonomous vehicles, mobility, satellite communication, 5G network.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, tem sido uma tendência mundial entre os maiores fabricantes de aeronaves o desenvolvimento uma nova geração de veículos para transporte de pessoas, visando à mobilidade urbana, e com foco em veículos movidos à energia elétrica, a fim de serem mais silenciosos e menos poluentes. Empresas como Boeing, Airbus, Embraer, Uber, Hyundai, Daimler, Toyota e Velocopter investem centenas de milhões de dólares em pesquisa e já possuem protótipos funcionais, não autônomos (Automative-iq, 2020).

Entende-se que, em um primeiro momento, tais veículos deverão ser tripulados como atualmente ocorre em serviços de taxi aéreo, ou seja, necessitando da presença de uma torre de comando, onde são gerenciados cada um dos voos, definição de rotas, corredores, gestão do espaço aéreo, etc. e provendo, desta forma, autorizações de partida e controle de aterrisagem de cada voo. No entanto, a expectativa é de que, em cerca de 10 anos (Gartner group, 2019), tais sistemas sejam totalmente autônomos, ou seja, sem piloto, e, portanto, não havendo a necessidade de uma torre de comando para a gerência do espaço aéreo e controle das partidas e chegadas dos voos.

Estas aeronaves autônomas serão capazes de voar em um espaço aéreo reservado, a fim de não conflitar com drones de pequeno porte (chamados de sUAS – Small Unmanned Aircraft System), os quais atualmente já fazem serviços de entregas de encomendas (Flytrex, 2020), em espaços aéreos compreendidos entre 100 pés de altitude, nem tampouco com as aeronaves comerciais de grande porte de asa fixa, que voam acima de 1000 pés. Com isso, há uma faixa de aproximadamente 900 pés onde os eVTOLs poderão operar.

A fim de que a funcionalidade do voo autônomo possa ser atingida, deverá ser implantada, entre outras coisas, uma rede de comunicação com a segurança e a resiliência necessárias para garantir o mínimo de compatibilidade com os padrões de segurança e disponibilidade atualmente aplicados à aviação comercial. Tal rede deve ter alta capacidade de tráfego de dados e baixíssima latência, a fim de garantir uma resposta rápida o suficiente para as manobras necessárias para o voo, além das redundâncias necessárias para atingir os níveis de disponibilidade desejados.

Para tanto, a proposta a ser avaliada durante este trabalho é a utilização da rede móvel 5G (quinta geração) (EMBRAER X), uma vez que ela tem alta capacidade de tráfego (acima de 1 Gbps) e já está sendo implantada em diversos países, incluindo o Brasil (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019). Além disso, a latência para o trecho aéreo do sistema é menor que 1ms, sendo fim-a-fim menor que 10ms, e dando, numa análise preliminar, condições técnicas para sua utilização como sistema de comunicação a ser empregado nos eVTOL.

Para se atingir uma maior disponibilidade da rede como um todo, poderá ser analisada ainda uma segunda rede de comunicação, complementar à primeira, tais como, as redes VSAT por satélite em banda Ka, as quais têm alcance global e que são capazes de cobrir possíveis áreas de sombra da rede 5G, podendo ainda ser uma contingência em caso de falha ou sobrecarga da 5G. Estas redes, atualmente disponíveis através de diversas operadoras espalhadas pelo globo, atuam por meio de satélites geoestacionários, posicionados em órbitas fixas. Porém, há uma nova geração de satélites em desenvolvimento, patrocinada por empresas como Oneweb, Starlink e Amazon (One Web, 2020, Starlink, 2020, Spacenews, 2019), que consiste de satélites menores, os quais estarão posicionados em órbita baixa, e constituirão de constelações que poderão chegar a centenas de unidades, provendo, desta forma, acesso à Internet em banda larga de forma contínua em qualquer parte do globo, e aumentando sobremaneira a disponibilidade da comunicação.

Este sistema, assim como atualmente acontece com as aviações civil e militar, deve ser considerado como um ambiente de segurança, uma vez que, além das vidas que estão sendo transportadas, há ainda a população que pode ser atingida por uma aeronave, estando esta sob falha mecânica, falha de hardware ou software ou falha motivada por falta de comunicação, esta última podendo ter sido causada por uma ação

intencional, uma invasão da rede, e consequente manipulação e controle remoto da aeronave (spoofing).

Por fim, empresas como a Amazon, e outras, estão colocando em seu portfólio entregas de livros e produtos por meio de drones, os quais, estão suscetíveis a ataques e interferências eletromagnéticas (Yaacoub, J. et al., 2020). Na Austrália, no mês de abril de 2019, foi iniciado oficialmente o serviço de entrega de encomendas por drones, pela empresa Wing (pertencente à Google). Atuando nos Estados Unidos e Nova Zelândia, também há a empresa Flirtey.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é apresentar os possíveis sistemas que podem compor o framework, de tal forma que este possa prover as funções de comunicação, entre aeronaves e com o sistema de gerenciamento do espaço aéreo, e a navegação, para prover com precisão a localização da aeronave, informação esta que será utilizada pelo sistema de gerenciamento do espaço aéreo para controlar todas as aeronaves em voo e em solo, aguardando autorização para decolagem.

2. REQUISITOS TÉCNICOS

O framework base proposto pelo presente trabalho está baseado essencialmente em duas frentes distintas, as quais se mostram necessárias para que as aeronaves possam realizar seus voos de forma totalmente autônoma: i. comunicação, para que haja a troca de informações da aeronave com o centro de gerenciamento e também entre as próprias aeronaves; e ii. o geo-referenciamento, para que estas tenham a informação exata da sua localização e altitude, a fim de que estes dados sejam informados ao centro de gerenciamento para o controle de cada uma das aeronaves que estão em voo na região.

2.1 COMUNICAÇÃO

Este sistema é responsável pela transmissão segura e contínua dos dados referentes às condições da aeronave (Keysight Technologies, 2018), tais como nível de bateria, velocidade, dados do sistema de gerenciamento da aeronave (como possíveis defeitos), informações do sistema de detecção de colisões e do radar meteorológico, localização e altitude (estes últimos dados provenientes do sistema de localização), bem como o recebimento de informações provenientes do centro de gerenciamento, para definição de origem e destino, autorização de decolagem e pouso, determinação e correção de rota.

Devido à importância crítica deste sistema, a transmissão deve ser segura, tanto do ponto de vista eletromagnético (o sistema deve ter a capacidade de suportar ataques intencionais e interferência natural da transmissão), quanto do ponto de vista lógico, com ataques provenientes de hackers, que têm o intuito de gerar sobrecarga da rede (ataques DDoS, por exemplo) e alterações de informações, o que poderia gerar a interrupção do serviço ou acidentes como colisões entre aeronaves.

Por outro lado, como forma de garantir uma disponibilidade compatível com a aviação civil atual, é proposta a utilização de duas formas de comunicação simultâneas: redes móveis 5G (quinta geração) e serviços VSAT (transmissão por satélite) em Banda Ka. Esta disposição visa tanto a aumentar a redundância da rede quanto cobrir possíveis regiões de sombra nas células da rede 5G, bem como possíveis interrupções do serviço por satélite, em virtude de instabilidade climática, por exemplo.

A utilização simultânea de ambas se daria de forma espalhada, na qual as informações trafegariam preferencialmente pela rede 5G, devido à sua baixa latência e, em caso de congestionamento, falha ou ausência de sinal, em função da aeronave trafegar em uma região onde não haja cobertura da rede móvel, a transmissão seria comutada automaticamente para o serviço Banda Ka.

2.1.1. REDES MÓVEIS 5G

As redes móveis de quinta geração estão sendo adotadas em diversos países pelo mundo (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2019), e têm como principais diferenciais, em relação às gerações anteriores, o aumento de velocidade para upload e

download, que podem chegar a até 10 Gbps e 20 Gbps respectivamente, em função de utilização de largura de banda consideravelmente maior, uma vez que se utilizam faixas de frequência menos congestionadas, além de uma baixíssima latência, de cerca de 1 ms na interface aérea (Keysight Technologies, 2018). Em especial este último se mostra como um fator extremamente importante para que haja uma resposta rápida da aeronave em função de uma mudança de parâmetro e controle de voo. Outra característica importante é a de suportar velocidades de até 500 km/h dos terminais conectados, o que garante a conexão das aeronaves mesmo no seu limite de velocidade de deslocamento. No caso dos eVTOL, a expectativa de velocidade de cruzeiro das aeronaves é de 320 km/h, o que garante uma perfeita conexão com a rede 5G (Neto, E. et al., 2019).

Além destas características, a rede 5G também proporciona novas funcionalidades de rede, quais sejam (Keysight Technologies, 2018):

- Network Slicing: permite que a rede móvel seja dividida em redes lógicas distintas, cada uma com uma configuração diferente de acordo com sua função, como acesso broadband (eMBB) maciço entre máquinas, como IoT (mMTC) e o que se aplica a este trabalho, o ultra confiável e de baixa latência (URLLC). Para cada uma dessas redes, pode ser configurado um nível diferente de QoS, tempo de resposta (latência da rede), consumo de energia, velocidade em que o dispositivo pode se locomover, quantidade de elementos conectados, e redundância de elementos de rede, garantindo assim uma maior disponibilidade do serviço.

- Comunicação entre dispositivos: Este recurso permite que dispositivos 5G se conectem uns aos outros, sem a necessidade de conexão com o core da rede, o que, aplicado à uma aeronave, permitiria que esta se comunicasse com as aeronaves próximas para a troca de informações de posicionamento, velocidade e condições de tráfego, por exemplo.

2.1.1.1 VULNERABILIDADES

Entretanto, entende-se que a utilização de redes 5G para o controle e comunicação de eVTOL pode levar também a algumas vulnerabilidades. Tais ameaças presentes na rede móvel 5G podem ser divididas em dois grupos distintos:

- Ameaças eletromagnéticas: onde verificam-se ruídos nas frequências utilizadas pelas redes móveis, em uma potência maior que o recebido pelos terminais provenientes das torres de transmissão e, quando somados a estes, anulam o sinal, fazendo com que a conexão com a rede seja interrompida. A maioria dos bloqueadores disponíveis no mercado, os quais possuem venda controlada somente para órgãos de segurança, tem o alcance de algumas dezenas de metros. Porém, quando estes são acoplados a antenas de maior ganho, como as do tipo Yagi, podem aumentar este raio de ação, bem como se colocadas em pontos estratégicos, como próximos aos pontos de desembarque dos eVTOL, podem comprometer o serviço, gerando a necessidade de paralisação das atividades durante o período do ataque. Uma forma de prevenção deste tipo de ataque é a utilização de serviços complementares, como as redes de satélite em banda Ka.

- Ameaças lógicas: as redes 5G tem os seus elementos de núcleo todos virtualizados (VNF – Virtual Network Functions), ou seja, não há equipamentos físicos para a comunicação, como havia até as redes 4G (LTE). Todos os serviços de rede prestados são softwares instalados em servidores e, desta forma, possuindo as mesmas vulnerabilidades que os sistemas corporativos, por exemplo. Assim sendo, devem ser implantados na rede serviços de proteção como sistemas de detecção e prevenção de invasão (IDS/IPS) e criptografia do tipo TLS (Transport Layer Security) entre as VNFs, para que a comunicação entre estes elementos seja segura e tenha processos de validação de identidade confiáveis, e não permitindo, desta forma, que uma máquina externa (invasora) se passe por um elemento da operadora e assim tenha acesso ao núcleo da rede.

Outro tipo de ataque possível é o DDoS (Distributed Denial of Service), que consiste em utilizar os clientes de rede invadidos por hackers (no caso as próprias aeronaves), para atacar os servidores da rede. Neste ataque, os terminais geram um fluxo de dados excessivo nos servidores (tráfego de rede), os quais não suportam a carga adicional e têm os serviços interrompidos, a partir da paralização das aplicações residentes nos servidores. Estes ataques também geram tráfego superior à capacidade nos links de comunicação, congestionando-os e consequentemente gerando perda de pacotes acima do volume tolerável, em função da expiração do tempo de vida destes.

Assim, tanto a rede quanto as aeronaves devem ser protegidas. Do lado da rede, deverão ser utilizados sistemas Anti-DDoS existentes do mercado, que analisam os dados trafegados e, por meio de algoritmos, identificam os possíveis ataques em função das anomalias geradas na rede, tomando a proteção necessária para bloqueá-los (Huawei, 2016). Já do lado das aeronaves, deve ser feita a proteção contra a invasão do seu sistema de bordo, por meio de uma autenticação segura e de firewall, de forma a evitar que esta seja controlada remotamente, que seja utilizada para gerar o fluxo de dados excessivo no núcleo da rede.

2.1.2 REDES VSAT EM BANDA KA

Os satélites que formam as redes VSAT possuem alcance continental e podem prover acesso a redes privadas e à Internet sem áreas de sombra nos grandes centros urbanos, gerando assim uma redundância às redes 5G. As redes em Banda Ka trabalham com frequências entre 29 e 30 GHz para uplink (da Terra para o espaço) e entre 17,2 e 20,2 GHz para downlink (no sentido contrário) (Microwaves & RF, 2018), atingindo velocidades de até 50 Mbps no downlink. Aeronaves remotas não tripuladas, como o General Atomics Reaper (General Atomics, 2015), que realizam missões de até 27 horas ininterruptas, utilizam, ao invés da banda Ka, a Banda Ku para comunicação, usando uma faixa de frequência inferior (de 13,75 a 14,5 GHz para uplink e de 10,7 a 12,75 GHz para downlink), entretanto se mostrando menos susceptível aos efeitos atenuantes da chuva, apesar de ter uma taxa de transferência de dados inferior à Banda Ka. A fim de contornar esse problema de atenuação, entende-se que é possível empregar uma maior potência de transmissão na estação terrena e utilizar modulação e codificação adaptativa (Microwaves & RF, 2018) e, assim, aproveitar os benefícios da maior taxa de transmissão das redes em Banda Ka em quaisquer condições atmosféricas.

Um outro ponto importante nas comunicações por satélite é o atraso gerado, em virtude da distância do satélite, o qual geralmente é geoestacionário, ou seja, está posicionado a 36.000 km de altitude. Este atraso, da ordem de dois segundos (Salles, F., janeiro/2020), pode ser mitigado com a utilização de uma rede VSAT do tipo malha (mesh), a qual possibilita a comunicação entre pontos remotos da rede, ao invés da topologia tradicional do tipo hub, na qual há uma estação concentradora, tendo cada ponto que enviar seus dados para esta estação a fim de que sejam retransmitidos para a estação de destino, aumentando assim o percurso.

2.1.2.1 VULNERABILIDADES

Como todo sistema de transmissão de dados baseado em ondas eletromagnéticas, neste também existe a possiblidade de haver a degradação e alteração do conteúdo de forma intencional. No caso específico de transmissões via satélite, isso se mostra possível por meio de sistemas inclusive disponíveis no mercado, os quais foram desenvolvidos para anular a transmissão realizada pelo satélite a partir do solo (Los Angeles Air Force Base. (2020).

Para mitigar tal tipo de ataque, uma alternativa viável é a utilização de feixe de laser para a comunicação da aeronave com o drone. Este experimento está em testes pela Força Aérea dos Estados Unidos, por meio do sistema ALCoS (acrônimo de Airborne Laser Communication System), conectado ao drone MQ-9 Reaper (General Atomics, 2020). Como uma transmissão por laser atua numa faixa de frequência muito maior do que as bandas de micro-ondas (no caso, bandas C, Ku e Ka), a

interferência nesta faixa é extremamente complexa, dificultando qualquer intenção de interrupção ou adulteração de sinal, entretanto devendo estar disponível somente nas fases de decolagem e pouso, bem como nas fases imediatamente anteriores, uma vez que depende de visada direta entre pontos.

2.2 NAVEGAÇÃO

2.2.1 SISTEMAS GNSS

Os sistemas GNSS (acrônimo de Global Navigation Satellite System) têm por função a geração de informação de posição de um determinado terminal, por meio de redes de satélites posicionados em órbitas de média altitude (cerca de 20.000 km), e que, a partir da visualização pelo terminal de pelo menos 3 satélites no espaço, tornar possível realizar a trilateração e consequente cálculo da sua posição (Kaplan, E. D.; Hegarty, C. J., 2006). Com a visualização de um quarto satélite, o sistema também pode calcular a altitude do terminal. Atualmente existem seis sistemas operacionais, lançados por diversos países (GPS, 2020):

- GPS (Global Positioning System), do governo norte-americano, composto por 24 satélites distribuídos em 6 órbitas distintas, que operam nas frequências de 1.575,42 MHz (L1), 1.227,60 MHz (L2) e 1.176,45 MHz (L5), dispondo de serviços para o público civil em geral e para os ramos militares e governamentais do governo norte-americano, onde é inserido um código para encriptação dos dados e aumento da precisão das medidas, fazendo com que o sinal consiga ser lido somente por terminais autorizados (chamado de modo M). O governo norte-americano está implantando atualmente, de forma progressiva, a terceira geração de satélites (chamado de Block III) (GPS, 2020);

- GLONASS (GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema – Sistema de Navegação Global por Satélite em russo), serviço disponibilizado pelo governo russo, que é formado por uma constelação de 24 satélites, porém distribuídos em 3 órbitas somente, atuando nas frequências de 1.602 MHz (F1) e 1.246 MHz (F2) (GLONASS, 2020).

- Galileo – Sistema implantado pelo União Européia, tem a previsão de funcionamento de 30 satélites (24 operacionais e 6 de reserva), distribuídos em 3 órbitas, estando atualmente com 22 satélites operacionais. Neste sistema os sinais são distribuídos em 3 faixas (E1, E2 e L1), que operam em 1.575,42 MHz (European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2020).

- BeiDou Navigation Satellite System (BDS) (Bússola em chinês), possui uma rede planejada de 35 satélites, dos quais 34 estão operacionais. A diferença deste sistema para os demais é que são utilizadas também órbitas geoestacionárias, além de estabelecer uma comunicação duplex entre os segmentos espacial e terrestre para a realização de medidas de posição dos usuários. A frequência utilizada pelo sistema é de 2.491,75 MHz (BEIDOU, 2020).

- Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS), também chamado de NavIC (acrônimo de Navigation with Indian Constellation), sistema desenvolvido pelo governo indiano, que possui uma constelação de 7 satélites, todos já operacionais, que realizam a cobertura do Oceano Índigo e partes da Ásia e Oceania, além da costa leste da África. Assim como o sistema chinês, há uma mescla de órbitas médias (onde se localizam 4 satélites) e geoestacionárias (contendo os 3 satélites restantes). Opera nas bandas 1.176,45 MHz (L5) e 2492.028 MHz (S) (ISRO, 2020).

- Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), também conhecido como Michibiki, desenvolvido pelo governo japonês, tem cobertura regional, atendendo às regiões da Ásia e Oceania. O projeto contempla um conjunto de 7 satélites, dos quais 4 estão operacionais no momento. Estão dispostos em órbita elíptica, e por isso, apesar de estarem a uma altitude de cerca de 42.000 km, não são geoestacionários (QZSS, 2020). Diferentemente dos outros sistemas, seus satélites, na segunda geração, não possuem relógios atômicos embarcados, utilizando para a sincronização de horário um sistema

específico. As frequências utilizadas são compatíveis com o sistema GPS norte-americano.

Na proposta desenvolvida nesse trabalho de framework para os veículos eVTOL, estes sistemas têm um papel preponderante, pois proverão a posição de cada aeronave para que o sistema de controle aéreo possa realizar a gestão das aeronaves em voo, bem como daquelas que aguardam liberação para tal. Para tal utilização, o sistema da aeronave pode utilizar receptores que recebam dados de mais de uma das redes citadas, aumentando, desta forma, a segurança e disponibilidade, uma vez que reduz a possibilidade de perda de sinal com os satélites.

2.2.1.1 VULNERABILIDADES

Devido ao SNR (Signal to Noise Ratio – Relação Sinal-Ruído) ser muito baixo, em função da distância do receptor GNSS até o satélite, estes sistemas se tornam muito suscetíveis à interferência intencionais ou não. Dentre as possíveis interferências, podem ser destacadas (Spirent, 2018):

- Não intencionais – atmosféricas (cintilação e atividade solar), transmissão multicaminho (reflexão do sinal transmitido em edifícios e outros objetos de grande porte) e áreas de campo magnético intenso, como regiões próximas a centrais de conversão de energia, transformadores, linhas de transmissão e torres de celular;

- Intencionais – jamming, que consiste no bloqueio de sinal recebido pelos receptores GNSS, spoofing, que trata do comprometimento da informação recebida por meio de um sinal falso transmitido por um equipamento atacante, adulterando, por exemplo, as coordenadas do ponto que o usuário se encontra e hakking, onde é feita a manipulação da camada de software do dispositivo, com o intuito de interpretação do sinal recebido do satélite.

No que diz respeito às interferências intencionais, foco deste estudo, existem diversas ocorrências de ataques, nas quais houve interrupção de sinal ou comprometimento da informação recebida pelos terminais (Faria, L. A. et al., 2018, Faria, L. A.; Silvestre C. A.; Correia, M. A. F., 2016). Em (Faria, L. A. et al., 2018), foi realizado um estudo com a simulação de um ataque do tipo spoofing, onde foram inseridas coordenadas incorretas em diversos tipos de terminais e analisados os seus resultados. Em terminais de menor complexidade, como GPS veicular e smartphone, a coordenada incorreta foi completamente aceita pelo terminal. Já em terminais mais complexos, como os utilizados em aeronaves, houve a identificação do falso sinal e a negação deste, porém os equipamentos não receberam os sinais corretos, o que poderia deixar vulnerável a navegação da aeronave.

Em (Faria, L. A. et al., 2018) é avaliada a influência do EIRP, (Effective Isotropic Radiated Power, em inglês, ou potência isotrópica radiada equivalente) do transmissor de um equipamento de ataque no alcance deste sinal, com o intuito de realizar jamming, no qual foi verificado o nível de interferência de sinal no receptor, a fim de determinar a distância em que não há impacto do transmissor atacante no receptor, preservando assim a recepção do sinal original.

Como forma de proteção do receptor aos ataques do tipo jamming e spoofing, existem no mercado equipamentos que podem ser agregados à aeronave, tais como o Cobham GPS Anti-Jam (Cobham, 2018). Estes equipamentos realizam a proteção dos códigos C(A), P(Y) e M que compõem o sinal GPS, além dos novos padrões de antena, que possibilitam a identificação da direção de incidência do sinal atacante, preservando a recepção do sinal original.

Outra forma de mitigar o impacto gerado por um ataque nos sistemas GNSS é a utilização do serviço eLORAN (Enhanced Long Range Navigation) (Faria, L. A.; Silvestre C. A.; Correia, M. A. F., 2016), o qual está disponível em grande parte do Hemisfério Norte, sendo constituído por uma grande rede de transmissões terrenas e se diferenciando dos sistemas GNSS por possuir uma alta relação sinal ruído, o que o torna mais difícil de sofrer jamming e spoofing, além de proporcionar

uma cobertura maior, atingindo inclusive espaços cobertos (Stanford University – Dept. of Engineering., 2020).

2.2.2 SISTEMA ADS-B

O sistema de vigilância ADS-B (acrônimo de Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) possibilita a recepção e transmissão de dados entre as aeronaves e o centro de controle do espaço aéreo, com as informações referentes a parâmetros de voo como: posição, altitude, velocidade, identificação, radial, destino, origem e razão de subida/descida. Estes dados são coletados dos diversos sensores da aeronave, incluindo o receptor GNSS. Assim, o centro de controle do espação aéreo tem a situação da atitude real e precisa de cada aeronave, dando mais precisão nas atividades, principalmente em regiões com alta densidade de tráfego, aumentando em demasia a segurança do ambiente. Em comparação com os sistemas de radar utilizados atualmente, este sistema representa um grande avanço, pois tem à sua disposição uma quantidade maior de dados em um único sistema, o qual realiza a fusão destes. Na maioria dos ambientes, estes dados são provenientes dos radares primários e secundários, dos controles manuais dos controladores aéreos e de informações trocadas por comunicação de voz entre os pilotos e os controladores, aumentando, desta forma, a probabilidade de erros devido à complexidade do sistema e quantidade de interações realizadas. Há também a questão de custo, na qual o sistema ADS-B se mostra como uma grande redução em relação aos radares empregados atualmente.

Alguns países, como os Estados Unidos, já estão empregando o sistema ADS-B, onde, a partir de janeiro de 2020, todas as aeronaves devem obrigatoriamente utilizar o sistema (Federal Aviation Administration, 2020). No Brasil, ele está em uso na região de Campos, no Rio de Janeiro, nas aeronaves que fazem a ligação entre o continente e as plataformas de petróleo (Departamento de Controle do Espaço Aéreo, 2020).

O sistema possui duas modalidades de comunicação: ADS-B Out, onde a aeronave envia os dados coletados para o centro de controle do espaço aéreo somente. Já na modalidade ADS-B In, a aeronave possui a capacidade de recepção de dados, como de congestionamento do espaço aéreo proveniente do centro de comando e de outras aeronaves, e sendo, desta forma, uma alternativa viável, com complementação dos sistemas TCAS (acrônimo de Traffic Collision Avoidance System – Sistema Anticolisão de Tráfego) atualmente empregados em aeronaves de médio e grande porte. São utilizadas duas frequências distintas: 978 MHz, conhecido como UAT (Universal Access Transceiver), que é o modo mais comum de uso, no qual há a transmissão das informações descritas anteriormente. Na frequência de 1.090 MHz, são utilizados os modos A, C e S nos transponders, podendo transmitir informações adicionais (Federal Aviation Administration, 2016). Nas aeronaves de pequeno porte, é utilizado o sistema TAS (Traffic Advisory/Alerting System), que atua em conjunto com o receptor GPS (UK Airprox Board, 2015).

A presente proposta de implantação de framework do sistema de navegação para as aeronaves eVTOL prevê a utilização de ambos sistemas, ADS-B e TCAS, para aumento da precisão das informações geradas e transmitidas para o centro de controle do espaço aéreo e da redundância, uma vez que um sistema pode atuar em caso de falha do outro. O sistema TCAS opera das frequências de 978 e 1.090 MHz.

3 CONCLUSÃO

Os veículos aéreos movidos a eletricidade têm ganhado relevante espaço no desenvolvimento de novos produtos dos principais fabricantes mundiais de aeronaves, devido não só à economia que podem trazer, mas ainda na redução de emissão de poluentes que proporcionam. Para proporcionar um aumento de capacidade de tráfego aéreo, redução de custos e melhoria na segurança do voo, a automação do voo é um caminho vislumbrado, com diversas pesquisas sendo desenvolvidas pelo mercado, tanto para o meio civil como militar, e já estando previsto para a próxima década. Para tanto, são necessários

serviços de telecomunicações com alta velocidade, segurança, resiliência e baixa latência, tanto para a comunicação da aeronave com o centro de controle como entre aeronaves próximas, além dos sistemas de navegação, que devem ser precisos e altamente disponíveis. Esta pesquisa preliminar descreveu os sistemas que podem ser utilizados para tais aplicações, englobando aqueles sistemas já disponíveis no momento e os que assim estarão no futuro próximo. Caracteriza-se por um estudo preliminar, sendo aprofundado com a definição das adequações necessárias nos sistemas de comunicação às exigências do meio aeronáutico em termos de qualidade e nível de serviço, além de aprofundar o desenvolvimento de medidas de proteção (contra contramedidas eletrônicas) para evitar ataques que possam ser feitos à infraestrutura, tanto nos ambientes eletromagnéticos quanto nos lógicos.

Assim, apesar de neste trabalho termos determinado e mapeado os sistemas passíveis de utilização no framework em pauta, entende-se que maiores detalhamentos serão realizados em trabalhos futuros, nos quais se determinarão a implementação dos sistemas, bem como, por meio de indicadores e relações de compromisso, apresentar-se-ão soluções passíveis de implementação para diferentes cenários, seja de custo, de desempenho, ou de quantidade de infraestrutura, abordando eficiência e segurança em todos eles.

Referências

Automative-iq. (2020). Top five automotive and aircraft industry partnerships. Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.automotive-iq.com/autonomous-drive/articles/top-five-automotive-aircraft-industry-partnerships.

Gartner group. (2019). 5 Trends Appear on the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies. Acesso em 17 fev 2020 de: https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/.

Flytrex. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://flytrex.com/

EMBRAER X. Flight Plan 2030. Acesso em 04 nov 2019 de: https://embraerx.embraer.com/global/en

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2019). Estratégia Brasileira de Redes de Quinta Geração (5G). Acesso em 28 abr 2020 de: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/sessaoPublica/sessao_publica/estrategia5g.html

One Web. (2020). Acesso em 04 jun 2020 de: https://www.oneweb.world/

Starlink. (2020). Acesso em 04 jun 2020 de: https://www.starlink.com/

Spacenews. (2019). Amazon planning 3,236-satellite constellation for internet connectivity. Acesso em 04 jun 2020 de: https://spacenews.com/amazon-planning-3236-satellite-constellation-for-internet-connectivity/

Yaacoub, J. et al. (2020). Security analysis of drones systems: Attacks, limitations and recommendations. Beirute: Elsevier Enhanced Reader, 39p.

Keysight Technologies. (2018). The ABCs OF 5G New Radio Standards. Acesso em 28 abr 2020 de: https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-06362/ebooks/5992-3406.pdf

Keysight Technologies. (2018). 5G New Radio Standards. Acesso em 02 mai 2020 de: https://www.keysight.com/br/pt/assets/7018-06362/ebooks/5992-3406.pdf

Neto, E. et al. (2019). Trajectory-based Urban Air Mobility (UAM) Operations Simulator (TUS). São Paulo: Escola Politécnica USP, 32p.

Huawei. (2016). Huawei AntiDDoS8000 DDoS Protection System. Acesso em 20 mai 2020 de: https://carrier.huawei.com/en/products/fixed-network/b2b/Security/DDoS-Protection-System/AntiDDoS8000

Microwaves & RF. (2018). What Makes Ka-band Systems Tick?. Acesso em 07 mai 2020 de:

https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849025/what-makes-kaband-systems-tick
General Atomics (2015). General Atomics MQ-9 Reaper / Predator B Data Sheet. 2015. Acesso em 07 mai 2020 de: https://www.ga-asi.com/images/products/aircraft_systems/pdf/Predator_B021915.pdf
Salles, F. (janeiro/2020). O Ataque ao Líder Militar do Irã. Aero Magazine, São Paulo, ano 25, ed. 308, pag 70-74.
Los Angeles Air Force Base. (2020) Counter Communications System Block 10.2 achives IOC, ready for the dogfihter. Acesso em 20 mai 2020 de: https://www.losangeles.af.mil/News/Article-Display/Article/2111775/counter-communications-system-block-102-achieves-ioc-ready-for-the-warfighter/
General Atomics. (2020). GA-ASI Successfully Tests Air-To-Space Laser Communication System. Acesso em 27 abr 2020 de: http://www.ga.com/ga-asi-successfully-tests-air-to-space-laser-communication-system
Kaplan, E. D.; Hegarty, C. J. (2006). Understanding GPS: Principles and Applications. 2nd. Ed. Mariland: Artech House. 703 p.
GPS. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.gps.gov/systems/gnss/
GPS. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.gps.gov/systems/gps/space/
GLONASS. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.glonass-iac.ru/en/
European Global Navigation Satellite Systems Agency. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.gsa.europa.eu/
BEIDOU. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: http://en.beidou.gov.cn/.
ISRO. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.isro.gov.in/irnss-programme
QZSS. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://qzss.go.jp/en/
Spirent. (2018) Fundamentals of GPS Threats. Acesso em 16 mai 2020 de: https://www.spirent.com/-/media/white-papers/positioning/fundamentals-of-gps-threats.pdf
Faria, L. A. et al. (2018). Susceptibility of GPS–Dependent Complex Systems to Spoofing. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 11 p.
Faria, L. A.; Silvestre C. A.; Correia, M. A. F. (2016). GPS-Dependent Systems: Vulnerabilities to Eletromagnetic Attacks. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 11 p.
Faria, L. A. et al. (2018). GPS Jamming Signal Propagation in Free-Space, Urban and Suburban Environments. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 8 p.
Cobham. (2018). Cobham GPS Anti-Jam Solutions for Air, Land and Sea Datasheet. Acesso em 08 abr 2019 de: https://www.cobham.com/media/2059118/anti-jam-gps-family-brochure-web.pdf
Stanford University – Dept. of Engineering. (2020). LORAN and eLoran. Acesso em 19 mai 2020 de: https://gps.stanford.edu/research/early-research/loran-and-eloran
Federal Aviation Administration. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.faa.gov/nextgen/programs/adsb/
Departamento de Controle do Espaço Aéreo. (2020). Acesso em 05 jun 2020 de: https://www.decea.gov.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=sistema-ads-b-comeca-a-operar-na-bacia-de-campos
Federal Aviation Administration (2016). Pilot´s Handbook of Aeronaltical Knowledge. Oklahoma City: 524 p.
UK Airprox Board. (2015). ACAS/TCAS/TAS. Acesso em 18 mai 2020 de: https://www.airproxboard.org.uk/Topical-issues-and-themes/ACAS/TCAS/TAS/

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS COMPANHIAS AÉREAS POR ROTAS: CASO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DO RECIFE

Daniel Lopes Nader de Azevedo, Viviane Adriano Falcão, Hélio da Silva Queiroz Júnior*
Federal University of Pernambuco, Technology and Geosciences Center - CTG

*** Corresponding author e-mail address**: helio.junior@ufpe.br

PAPER ID: SIT126

ABSTRACT

The high demand for air transport for passengers or transport of cargo and goods has been providing logistical changes in airport infrastructure, while efficient solutions require improved economic performance as well as reduced impacts on the climate crisis that the world is going through. The increase in air demand drives competition between airlines, as they must have aircraft with up-to-date equipment maintenance and suitable for each type and nature of flight. Thus, this work aims to evaluate the efficiency of four airlines operating at Recife/Guararapes International Airport (SBRF) in 2019 for each type of flight, evidencing the performance results obtained by the application of Data Envelopment Analysis (DEA) in two scenarios, as well as commenting on the results evidencing possible effects of each company's aircraft on the results. In general, the analysis showed that Azul has greater efficiency than its competitors, mainly due to the adoption of the ATR-72 model on short-haul flights. In addition, the application of the model showed that long flights are more efficient than short or medium-haul flights, with the company with the lowest performance being approximately 99% efficiency.

Keywords: Efficiency, Airlines, DEA.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas muito tem se debatido quanto ao impacto da emissão de poluentes pelas aeronaves no aquecimento global e quais suas consequências e formas de mitigar ou eliminar essas substâncias das rotas de aviação. O combustível de aviação é um derivado de petróleo usado geralmente de uma qualidade maior que outros combustíveis fosseis com menos aplicações críticas para o aquecimento ou transporte, e nele estão contidos mais aditivos para reduzir o risco de congelamento ou até mesmo de explosão em temperaturas extremas, além de outras propriedades físico-químicas.

Segundo dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), de 2005 a 2014, o movimento das aeronaves no Brasil cresceu cerca de 75%, ao passo que as emissões de poluentes na atmosfera cresceram em 1,6 mil toneladas, um aumento de 32%. Os voos domésticos representaram 83% das emissões de poluentes, como o monóxido de carbono (CO), e os voos internacionais 17%, além da presença de outros gases também tóxicos ao meio ambiente. Somente em 2018, pouco menos de 18 bilhões de kg de dióxido de carbono (CO2) foram emitidas pelas aeronaves pelo Brasil sendo responsável por cerca de 55% de emissões em voos nacionais e 45% em voos internacionais.

O crescimento no transporte aéreo estimula o consumo de combustível de aviação, sendo necessário que a cadeia deste insumo se adeque a possíveis aumentos de demanda das companhias aéreas. Devido a isto, as empresas que fornecem abastecimento devem visar as melhores soluções para garantir o suprimento e sua segurança operacional nos processos. Assim, torna-se de grande importância a simples melhoria e aperfeiçoamento de processos para redução de custos do combustível de forma a auxiliar na elucidação de alterações na cadeia deste produto para atender o mercado futuro.

Desta forma, o presente artigo objetiva analisar o desempenho de energia por rota e avaliar viabilidade de criação de estratégias operacionais para gestão dos aeroportos da malha aérea brasileira pelas companhias.

Além dissom propor soluções ao setor aeroportuário quanto a adoção de estratégias e equipamentos visando diminuição da emissão de gases poluentes das aeronaves e possíveis reestruturações da infraestrutura utilizando o modelo não-paramétrico DEA, em concordância com a Lei de Criação da ANAC (Lei nº 11.182, de 27 de setembro de 2005) que estabelece à Agência regular e fiscalizar as atividades de aviação civil e da infraestrutura aeronáutica e aeroportuária, observadas as orientações, políticas e diretrizes do Governo Federal.

2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS COMPANHIAS AÉREAS

Visando operações aéreas cada vez mais lucrativas e econômicas, todas as partes de um voo apresentam oportunidades de terem o seu consumo otimizado em decorrência da responsabilidade de estabelecer procedimentos próprios e em sintonia com as melhores práticas industriais, olhando continuamente a segurança e a eficiência. Nesta conjuntura, a infraestrutura aeroportuária interfere diretamente neste segmento, porque o consumo de combustível no taxiamento do voo é proporcional ao número de curvas, paradas e acelerações a que uma aeronave é submetida (KHADILKAR & BALAKRISHNAN, 2011).

Para Moriarty e Honnery (2012), a eficiência energética é um conceito dinâmico, que deve sofrer evolução com as conjunturas analisadas. No sistema de transporte, a eficiência energética deve ser mensurada a partir de um ponto de vista técnico, considerando as mudanças termodinâmicas envolvidas no sistema ou integrando o sistema e as pessoas. Neste caso especifico, a eficiência energética deve relacionar a energia consumida com algum *output* que seja útil aos usuários do sistema.

Segundo estudo de Chezè et al. (2011), foi aplicada a técnica de *forecasting*, que consiste em previsão utilizando analise de series temporais a partir de regressão múltipla de variáveis, como a demanda de combustível de aviação em uma análise de médio prazo, com previsões para 2025, com oito zonas geográficas e em escala mundial. A metodologia consistiu em dois passos, o

primeiro consistia em prever o fluxo total de tráfego e quais taxas havia crescimento ao longo dos anos, enquanto o segundo era responsável pela conversão da previsão de demanda em termos de quantidade de combustível em termos de coeficiente energético. Os resultados apontaram que a eficiência do consumo de combustível aumentou nas regiões estudadas no período de 1983 a 2006, além de concluir que a demanda por combustível de aviação não deva aumentar nesses territórios, apesar do tráfego aéreo aumentar. Ainda concluíram que três dessas oito regiões analisadas tem expectativa de diminuição de sua demanda até 2025 devido ao aumento da eficiência energética pelo aperfeiçoamento das tecnologias.

Jensen e Yutko (2014) indicam que em média a trajetória a ser voada é 9% superior à distância real em uma linha reta, devido a congestionamentos, estruturas aeroportuárias e relevo em torno do aeroporto. Um planejamento bem feito do voo aliado a uma política de abastecimento apropriada é um exemplo de forma para aumento da eficiência energética do combustível de aviação além da determinação do FIR (Região de Informação de Voo) que consiste no espaço aéreo de dimensões definidas nas cartas publicadas pelo CECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo), dentro do qual são proporcionados serviços de informação e alerta de voos. Ainda segundo os autores, a aquisição de aeronaves mais modernas pode ocasionar em uma economia de combustível perto de 20%, conquanto que haja investimentos em tecnologia.

Dessa forma, Brueckner e Abreu (2017) estimaram um modelo simples de uso de combustível em companhias aéreas, conectando o uso a um pequeno conjunto de variáveis cruciais. Os resultados permitiram uma avaliação de como as mudanças na frota, nas características operacionais de uma companhia aérea, e no preço do combustível que ela demonstra, afetam o uso de combustível e nível de emissões de carbono proporcional ao uso. Este estudo, porém, identifica outra mudança operacional que reduz o uso de combustível e suas emissões que pode ser alcançado por meio de políticas públicas de redução dos atrasos nos voos.

Enquanto que Cui e Li (2015), propuseram que o número de funcionários, estoque de capital e toneladas de querosene de aviação fossem escolhidas como *inputs*. Já RTK (*Revenue Ton Kilometer*), RPK (*Revenue Passenger Kilometer*), receita total de negócios e volume de emissão de gás carbônico são selecionados como os *outputs*. O modelo de eficiência cruzada benevolente de fronteira virtual (*Virtual Frontier Benevolent* DEA *Cross Efficiency*) ou VFB-DEA foi aplicado para avaliar a eficiência energética de 11 companhias aéreas entre os anos de 2008 e 2012. É proposto o uso desse modelo de eficiência cruzada que resolve duas limitações do modelo DEA tradicional: a limitação de auto avaliação e a limitação em distinguir DMUs (*Decision Making Unit*) eficientes no DEA.

3. METODOLOGIA

O universo da pesquisa serão as companhias aéreas que atuam no Aeroporto do Recife que possuem todos dados disponíveis a respeito de seus voos, através do banco de dados da ANAC para o ano de 2019, e avaliar sua eficiência energética levando em consideração infraestrutura e rota.

Em se tratando de infraestrutura aeroportuária, serão analisados os impactos sobre a eficiência energética que os modelos das aeronaves utilizadas pelas companhias aéreas que atendem ao Aeroporto do Recife como origem dos voos. Além disso, investigar a correlação entre a competição dentre as companhias aéreas e sua eficiência energética e analisando através do uso da Análise de Envoltória de Dados (DEA) que é uma metodologia de programação linear que quantifica empiricamente a eficiência relativa de múltiplas entidades semelhantes, ou DMU, (Cooper et al., 2007). Adicionalmente, comparar os desempenhos energéticos das companhias subdividindo entre tipos de distância de voos e, por fim, propor possíveis restruturações da malha do aeroporto em questão ou novas estratégias de distribuição de voos pelas companhias.

No que se refere a rota, será analisada a relação entre eficiência energética e concorrência entre as quatro companhias

aéreas e identificar o que as distinguem. Essas empresas se empenharão mais em oferecer melhores condições aos seus passageiros quanto maior for a competição entre as companhias, levando em consideração pontualidade ou preço das passagens aéreas e valores adicionais por excesso de bagagem, por exemplo.

O *software* utilizado para análise pelo método não-paramétrico da Análise Envoltória de Dados (DEA – *Data Envelopment Analysis*), que determina a fronteira por meio de técnicas de programação matemática e permite relacionar os inputs e outputs que farão parte deste trabalho, foi o *software MaxDEA*. A Figura 1 mostra o caminho a ser seguido por esse estudo:

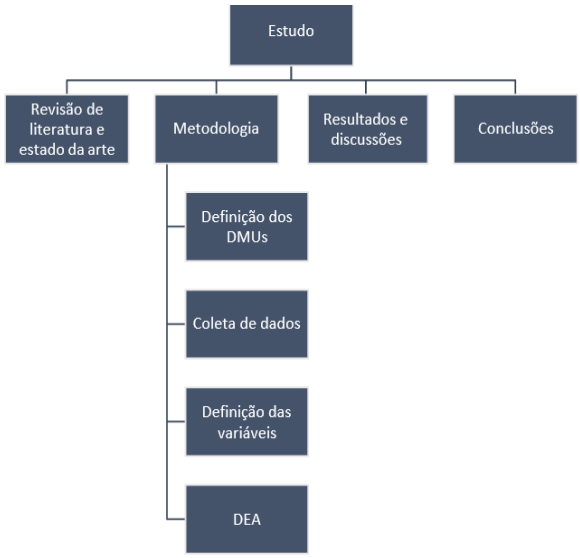


Figura 1 – Fluxograma de etapas deste estudo

3.1. Banco de dados e descrição das variáveis

A base de dados que será utilizada neste estudo, considerando dados mensais do período de janeiro a dezembro de 2019, avaliará a eficiência energética em relação aos tipos de rotas de voos – curta, média e longa distância – bem como sua natureza, domestica ou internacional, entre companhias aéreas que atuam no Aeroporto Internacional do Recife.

A base de dados estatísticos do transporte aéreo do Brasil considerada foi retirada do site eletrônico da ANAC (2019). Os dados considerados foram: combustível, Payload, ASK (*Available seat kilometer*), ATK (*Available tonne kilometer*), RPK (*Revenue seat kilometer*), RTK (*Revenue tonne kilometer*) e distância voada. Abaixo será explicado em detalhes os dados considerados.

Para este estudo, serão feitas análises de eficiência energética em relação aos tipos de voos e sua natureza, dividindo esta análise em dois cenários, onde no Cenário 1 possui combustível e *payload* como dados de entrada e RPK, RTK e distância voada como dados de saída, enquanto no Cenário 2 possui combustível, ASK, ATK como dados de entradas e RPK, RTK e distância voada como dados de saída.

Tabela 1 – Cenários do estudo de eficiência energética.

	Inputs	***Outputs***
1	Combustível (litros)	RPK
	Payload	RTK
		Distância voada (km)
2	Combustível (litros)	RPK
	ASK	RTK
	ATK	Distância voada (km)

A natureza do voo refere-se à natureza das etapas, sendo doméstica, caso as etapas tenham pouso e decolagem realizados no Brasil e internacional caso contrário. Os tipos de voos são classificados para este trabalho em: Voo curto é aquele com até 500 km de distância entre o par de aeroportos; voo médio entre 500 e 1500 km e longo acima de 1500 km.

Os nomes das DMUs do estudo serão uma junção da média da empresa aérea e seu tipo de distância e natureza do voo. Voos com algum dado zero ou faltando para estes cenários foram descartados, fazendo com que somente quatro companhias partindo de Recife sejam analisadas, que são a AZUL, GOL, OCEANAIR (Avianca) e TAM, totalizando 14 DMUs, sendo 4 para voos curtos, 3 para voos médios, 4 para voos longos domésticos e 3 para voos longos internacionais. A companhia OCEANAIR é a única que possui apenas dados de voos curtos e longos de natureza doméstica, para o estudo em questão. A Figura 2 apresenta a movimentação total de passageiros das

companhias aéreas estudadas para o Aeroporto do Recife:

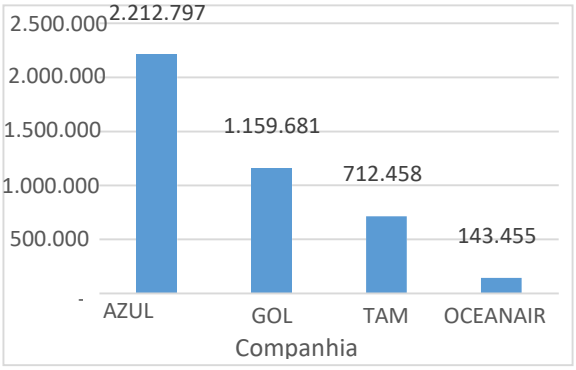


Figura 2 – Movimentação de Passageiros no Aeroporto do Recife em 2019

3.2. Modelagem

Considerando o anuário da ANAC para o período de janeiro a dezembro de 2019 e suas informações de voos com origem no Aeroporto de Recife, foram arbitrados esses cenários, como citado anteriormente por companhia aérea e tipo de voo. Com isso, os modelos a serem desenvolvidos serão CCR orientado a inputs, CCR orientado a outputs, BCC orientado a inputs e BCC orientado a outputs, de tal forma que seja possível uma análise comparativa entre seus resultados. As modelagens foram feitas utilizando o software MaxDEA 8 Basic.

Devido ao modelo CCR apresentar retornos constantes de escala, os dados geram uma reta cuja representação implica que DMUs que estejam na reta são consideradas eficientes e abaixo delas as ineficientes. No que se refere ao modelo BCC, trata-se do modelo CCR incorporando a possibilidade de retornos variáveis de escala, em outras palavras, o modelo BCC demonstra uma fronteira de eficiência que comporta retornos variáveis de escala. Por apresentar retornos variáveis de escala, o formato torna-se um quarto de elipse. DMUs que se encontram sobre a curva são consideradas eficientes enquanto as demais que se encontram abaixo da curva são as ineficientes. Uma exemplificação de melhoria de eficiência quando a DMU se encontra abaixo da curva para o cálculo da eficiência relativa, essa DMU não tem eficiência máxima, porém, orientando-a para inputs (diminuir insumo para produção da mesma quantidade de produtos), a DMU atingirá a fronteira e, consequentemente, 100% de eficiência. O mesmo processo pode ser realizado orientando-a outputs, atingindo fronteira de eficiência máxima.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os modelos citados limitam-se a retornos constantes de escala e retornos variáveis de escala, ambos orientados a *inputs* e *outputs*. Esta consideração em termos da orientação dos modelos permite uma visão detalhada, na qual seja possível a otimização dos recursos, concomitantemente a maximização dos produtos, em termos de gerenciamento de insumos às aeronaves utilizadas pelas companhias aéreas.

Os dados utilizados no cenário 1 consideraram o peso transportado pela aeronave, bem como o quantitativo de passageiros e carregamentos pagos.

O cenário 2 foi pensado da mesma forma, mas dando importância também ao volume transportado e quantidade de assentos oferecidos. Essa diferença nos cenários influencia na tomada de decisão das companhias aéreas quanto aos custos associados a cada voo, devido a tripulação, pessoal de apoio, limpeza e conservação da aeronave, combustível e serviços para atender os passageiros.

O fator de aproveitamento ou taxa de ocupação (load factor), que diz respeito à relação entre oferta e demanda, foi calculado por voo ou por etapa de voo, através da divisão do total de assentos ocupados por passageiros pagantes pelo total de assentos oferecidos em cada caso. Para uma companhia ou para a indústria, é calculado a partir da divisão do total de RPK pelo total de ASK daquela companhia ou de todas as companhias. Também pode ser aplicado de forma análoga para o transporte de cargas, indicando o quanto da capacidade ofertada foi efetivamente ocupada por itens que geraram receita para uma companhia.

A dificuldade na obtenção de dados completos relativos a cada companhia aérea é característica do modelo matemático em questão, fundamentando a escolha de variáveis relacionadas à movimentação por sua maior disponibilidade no banco de dados da ANAC

(2019). Como nem todas informações de voos estavam totalmente preenchidas, somente estas 4 companhias estão sendo avaliadas.

Conforme os microdados da ANAC para o ano de 2019, foi possível levantar quais aeronaves são utilizadas para cada companhia aérea que tem suas atividades no Brasil, além de estimar a autonomia da aeronave em quilômetros por litro levando em consideração a razão entre a distância voada pelo combustível. Esta relação é uma média de todos os voos com origem no Aeroporto de Recife e não entrou na modelagem DEA, sendo apenas um parâmetro de comparação com o resultado final deste estudo. A quantidade de assentos é dada também nos microdados, bem como o tipo de serviço, sendo de carga ou de passageiro para cada voo. Para o caso da quantidade de assentos, os valores não representam a quantidade total de assentos da aeronave e sim a quantidade de assentos ofertados pelas companhias aéreas, apresentados na Tabela 6.

Levando em consideração o critério autonomia, a Azul possui a maior autonomia média dentre as quatro de 0,2347 km/L, sendo o modelo Aerospatiale/Alenia ATR 72 Freighter o avião com melhor autonomia deste trabalho com 0,3798 km/L. Segundo folheto do fabricante, essa aeronave de médio porte é voltada para o mercado de taxi aéreo de passageiros em rotas domésticas, operando em curtas e médias distâncias, ideal para infraestruturas aeroportuárias de menor porte. O modelo ATR-72 possui propulsão de turboélice com mais potência estática aeronaves a jato de mesmo tamanho, facilitando operações de pouso com pistas 2 km ou menos de comprimento. Além disso, chega à velocidade máxima de 511 km/h, alcance de 1.528 km e uma altitude de 25 mil pés.

Visto que quanto maior a velocidade da aeronave maior será seu consumo de combustível, as aeronaves ATR-72 da Azul apresentam quase 50% de uso da potência máxima, o que pode influenciar positivamente na autonomia da aeronave.

Nesse estudo, a GOL possui modelos de aeronave Boeing-737 tendo 3 variantes no que diz respeito a suas especificações de tamanho e capacidade. Enquanto a TAM porta de modelos Airbus A319, A320 e A321 além de um Boeing 767 Greighter. Essas aeronaves de ambas companhias viajam em média 1.600 km em voo, com exceção do Boeing 767 da TAM que tem distância média de voo de mais de 5.000 km. Essas aeronaves são de porte maior que os utilizados pela AZUL quando voos curtos e médios são considerados.

4.1. Voos de Curta Distância

A distância dos voos influencia bastante sobre a eficiência energética das aeronaves pelo fato do maior consumo de combustível ocorrerem nos momentos de pouso e de aterrissagem e não em momentos de cruzeiro pela aeronave estar numa velocidade constante e, a depender da situação, tendo o benefício dos ventos. Entretanto, a AZUL é o benchmark desta análise para voos curtos pelo fato de suas aeronaves serem mais adequadas às rotas com uma autonomia de voo maior que de suas concorrentes.

Além da especificidade do ATR-72, a AZUL mostrou-se a mais eficiente tanto no CCR quanto no BCC, ambos orientados a insumos e produtos. Adicionalmente, ela teve a maior média de distância voada dentre as companhias, com aproximadamente 279,68 km voados, seguido da GOL com 173,00 km voados. Outrossim, o gasto com combustível foi menor com uma média de 853,53 L, mostrando-se um outlier quando é feita a comparação com as outras companhias.

Outro fator determinante que influencia este cenário é o modelo das aeronaves adotadas pelas outras companhias. Enquanto para voos curtos a preferência da AZUL seja a adoção de modelos econômicos como o ATR-72, nas outras companhias predominam modelos Boeing 737, Boeing 767 e Airbus A320, aviões de portes consideravelmente maiores que o ATR-72, com uma média de assentos ofertados de 179 enquanto na AZUL a média chega a 122 por voo, com o modelo ATR puxando a média para baixo com 68 assentos ofertados.

Dentre os menores desempenhos, aparece a TAM, que apesar da distância voada ser consideravelmente menor que a AZUL, apresenta *payload* 71,34% maior e, consequentemente, consumo maior de combustível que o benchmark. Essa

constatação pode ser elucidada melhor quando há uma comparação das especificações técnicas das aeronaves utilizadas pela própria TAM, que usa modelos Airbus e Boeing, considerados aeronaves de maior porte e que possui em média 190 assentos ofertados por voo em 2019 além de atingir velocidades maiores que o ATR-72, onde este atingiu velocidade de 246,81 km/h e aqueles em média 643,60 km/h por voo.

Entretanto, quando é feita a modelagem BCC orientada a produtos, maximizando a saída e mantendo entrada inalterada, há uma piora na eficiência destas DMUs, com exceção do benchmark. Isso se deve pela limitação que cada aeronave apresenta, visto que num possível aumento de oferta de passageiros ou de peso transportado, impacta diretamente sobre o consumo de combustível devido ao aumento de peso interno das aeronaves. Para o caso da AZUL, o modelo ATR-72 se mostra, mais uma vez, o ideal para uso em rotas de curtas distâncias uma vez que os serviços que a companhia demanda deste avião vão desde transporte de passageiros, transporte de carga ou ambos, dando uma maior margem estratégica de demanda para a AZUL.

No segundo cenário para voos curtos, há uma maior distribuição de eficiência dentre as companhias aéreas, com a AZUL, novamente, na liderança do ranking em todas as modelagens e orientações de insumo ou produto do estudo.

Comparando com o cenário 1 que tem a TAM com pior desempenho, no cenário 2 este lugar fica a cargo da GOL apesar de terem eficiência maior que 80%. Um decremento nos inputs, neste caso, não apresenta uma relação direta entre ambas as companhias, pois a taxa de ocupação da TAM é de 17,81% enquanto a GOL apresenta 0,09%, o que demonstra uma melhor distribuição de peso nas suas aeronaves, apesar da autonomia média ser de 81% da autonomia média da GOL.

4.2. Voos de Média Distância

Em voos médios, a OCEANAIR foi desconsiderada por não apresentar dados completos na base do anuário da ANAC (2019). Neste cenário, a AZUL é a mais eficiente disparando em relação as demais, assim como no Cenário 1 de voos curtos. Como apontado abaixo, a AZUL é a que consome menos combustível apesar de um *payload* próximo de suasconcorrentes, contudo, quase metade dos passageiros e carga transportadas em comparaçãocom a GOL e TAM.

No que se refere ao modelo CCR, independente da orientação os resultados se assemelham. No modelo BCC quando se minimiza insumos e mantem produto inalterado, nota-se uma melhora em sua eficiência quando é feita conferência quando se maximiza produtos e mantem insumo inalterado. Essa observação é quase imperceptível sobre a AZUL, porém evidente nas rivais.

O Cenário 2 apresenta um nivelamento dentro de cada companhia aérea, mas a AZUL deixando de ser benchmark deste cenário quando é analisada através do modelo CCR com uma eficiência de 99,6% da TAM e de 97,8% da AZUL. Isso se deve ao fato de a TAM ofertar mais assentos e oferecido mais transporte de carga em comparação a AZUL, ao passo que os passageiros pagos e carga transportada representarem quase o dobro que a sua concorrente, além de uma menor média de distância voada com uma diferença de pouco maisde 50 km.

Já no modelo BCC, a ordem muda e a AZUL retoma a liderança do benchmark e logo atrás a TAM com eficiência de 99,9%. Isso se deve mais pelo consumo médio de combustível da ATR pela AZUL ser de 3.570,71 L e distância média voada de 947,5 km, enquanto a TAM tem 6.021 L e 800,25 km, respectivamente. Este tipo de voo demonstra a estratégia que o consumo de combustível por quilometro influência no resultado deeficiência energética da frota de aviões do modelo ATR-72 da AZUL.

No que se refere aos voos de longa distância, sendo de natureza doméstica ou internacional, a análise torna-se mais complexa visto que para Khadilkar e Balakrishnan (2011) o consumo de combustível no taxiamento do voo é proporcional ao número de curvas, paradas e acelerações em que uma aeronave é submetida. Como o tempo de cruzeiro é muito maior que o tempo de taxi neste caso, a infraestrutura aeroportuária tem pouco impacto sobre sua

eficiência como um todo. Por isso, uma análise quantitativa quanto aos pormenores da infraestrutura aeroportuária na origem ou destino e as especificações técnicas das aeronaves torna-se imprescindível nesta avaliação considerando distâncias maiores que 500 km das viagens.

4.3. Voos Domésticos de Longa Distância

Quando é feita avaliação dos voos longos domésticos no Cenário 1, as companhias AZUL, GOL e OCEANAIR tem performances iguais, sendo a TAM única com comportamento diferente, apesar de apresentar eficiência de 99,4% no modelo CCR, o que já demonstra uma eficiência alta e muito aproximada das demais. A TAM utiliza aeronaves de grande porte dos modelos Airbus A319, A320 e A321 e Boeing 767. A autonomia de viagem média da companhia é de aproximadamente 0,18 km/L logo abaixo da OCEANAIR com 0,22 km/L, fazendo com que a TAM tenha a menor autonomia em relação as demais concorrentes.

Apesar dessa desvantagem perante as demais, isso não necessariamente representa umdemérito para a TAM. Ela é a que apresenta maior *payload* e concomitantemente maior relação de passageiros pagos e toneladas transportadas, com *market share* de aproximadamente 30% do mercado.

A análise aplicada ao Cenário 1 se repete também no Cenário 2, mas removendo o payload da avaliação e aplicando os assentos e toneladas ofertadas, na forma de ASK e ATK. Neste cenário, a OCEANAIR equipada com o seu Airbus A320 apresenta maiores valores ASK e ATK dando uma falsa sensação de baixa eficiência por ofertar mais lugares e poder transportar mais do que as demais, apesar de transportar bem menos passageiros que o resto. Porém, no balanço da eficiência, isso não afeta negativamente a eficiência energética da antiga AVIANCA devido a autonomia de sua aeronave atingir 0,22 km/L e a AZUL e GOL apresentarem 0,23 km/L e 0,22 km/L, respectivamente. Essa razão entre combustível e distância voada diretamente da base de dados da ANAC permite uma avaliação rápida perante a autonomia efetiva das aeronaves utilizadas por essas companhias aéreas, apesar de não entrar diretamente no DEA.

4.4. Voos Internacionais de Longa Distância

Em se tratando de voos de longa distância internacionais a OCEANAIR foi desconsiderada por não apresentar informações completas na base de dados do anuário da ANAC (2019). Não há uma diferença em termos de eficiência energética independente do modelo e sua orientação. Isso evidencia mais uma vez a afirmação de que tempo de cruzeiro maiores em comparação ao tempo de partida e pouso – onde há maior consumo de combustível das aeronaves.

Enquanto no Cenário 1 cabe uma análise quantitativa dos modelos de aeronaves devido à similaridade de suas eficiências energéticas, o mesmo não pode ser dito do Cenário 2 onde há uma diferença de quase 5% da TAM como benchmark e da AZUL, com aproximadamente 96%, conforme Gráfico 8. Neste cenário, a TAM adquire menos combustível e viaja em média mais do que a AZUL, além desta ofertar maior capacidade de carga e de assentos que a anterior. Isso pode ser explicado pelas dimensões de cada aeronave, visto que esta limitação espacial pode comprometer a eficiência das companhias aéreas, evidenciando a influência da infraestrutura sobre os custos operacionais delas.

Para essa natureza de voo, a AZUL dispõe de Airbus 320neo e 330-200 Freighter que chegam a medir 37,57 metros e 59 metros de comprimento e envergaduras de 34,1 metros e 60 metros, respectivamente, enquanto a TAM possui Airbus A320-100/200 e Boeing 767- 300 Freighter medindo 37,57 metros e 48,5 metros de comprimento e 35,8 metros e 47,6 metros de envergadura, respectivamente. O Aeroporto Internacional do Recife-Guararapes possui dimensões de pista de 3,3 km de comprimento por 45 metros de largura, o que já dificulta uma manobra ou posicionamento na pista destas aeronaves citadas.

Por demonstrarem eficiência acima de 90% em todos modelos e orientações de inputs e outputs, fica evidente que a companhia aérea

deve possuir controle da distribuição das aeronaves e de seus trajetos, para que não tenham custos excessivos devido a uma externalidade como a infraestrutura aeroportuária, sazonalidade, procedimentos operacionais, variação de preço do combustível, regulação a qual está submetida ou movimentação de outras aeronaves das empresas aéreas concorrentes. Para que um aeroporto possa receber mais voos ou aviões maiores, é preciso um investimento robusto em infraestrutura dos terminais aéreos para que haja melhor acomodação e fluxo nas pistas.

5. CONCLUSÕES

A reflexão sobre os dados permite verificar que a companhia aérea AZUL possui maior eficiência sobre maioria dos tipos de voos com origem em Recife tendo 100% de eficiência em voos curtos, longos domésticos e internacionais para o Cenário 1 (nos modelos CCR orientado a inputs e outputs e no modelo BCC orientado a orientado a inputs) e voos curtos, longos domésticos e em voos médios (no modelo BCC) para o Cenário 2. As demais companhias possuíram desempenho próximo ao benchmark, mas com exceção dos médios da GOL e TAM e voos curtos da GOL, OCEANAIR e TAM, no Cenário 1. Neste recorte, a TAM conseguiu até 31,3% de eficiência.

Em voos curtos, o modelo ATR-72 adotado pela AZUL demonstra maior eficiência nesse tipo de rota. Além disso a mudança de cenário demonstrou uma diferença significativa sobre a eficiência das companhias aéreas, evidenciando como a adoção do *payload* como input, que é a capacidade total de peso na aeronave, afeta a eficiência das companhias. Além de tudo, o modelo BCC possui maior eficiência que o modelo CCR neste tipo de voo. Os índices de eficiências do modelo BCC com orientação independendo de entrada ou saída não são iguais, como acontece com o modelo CCR, devido fronteira possuindo forma convexa, porem preservando à classificação entre as unidades eficientes ineficientes.

No geral, o estudo mostrou que há um indicativo de que os voos mais longos são mais eficientes independendo do modelo de aeronave pelas companhias aéreas, já que no voo de cruzeiro o consumo de combustível é menor, além de abranger a maior porção do tempo total que a aeronave percorre durante o voo.

Importante salientar que mesmo obtendo *benchmark* e considerado como modelo de aproveitamento de recursos, cada aeronave tem suas características específicas, como tipo de motor (que afeta o consumo de combustível) e suas dimensões. Por conseguinte, as companhias aéreas devem adaptar as práticas mais eficientes para suas particularidades e não planejar idêntica alocação de recursos que seus pares. Uma recomendação que se tira deste estudo seria trabalhar somente com transporte de passageiros ou de cargueiros e ver se os resultados se manteriam, já que neste estudo não houve essa diferenciação.

O modelo DEA-SBM (*Slacks-Based Measure*), que lida diretamente com excesso de inputs e déficit de outputs das unidades de decisão tem o diferencial de admitir orientação simultânea entre input e output, fazendo com que haja minimização das distancias a serem percorridas para atingir a fronteira de eficiência.

Possíveis trabalhos futuros podem evoluir a partir desse tema, como uma análise mais aprofundada nas especificações técnicas e operacionais de cada aeronave que uma companhia aérea adota para determinado voo, bem como uma análise aprofundada sobre a infraestrutura aeroportuária, como área, tamanho de pista e presença de saídas rápidas, e sua influência e impacto sobre a eficiência energética das aeronaves, visto que no voo de cruzeiro o avião consome menos combustível do que nos momentos de decolagem e aterrisagem.

Adicionalmente como sugestão, uma análise trimestral ao invés da anual, visto que climas adversos podem influenciar sobre as condições de voo podendo modificar, sazonalmente, o tempo de voo e consumo de combustível. Outra sugestão, seria analisar o consumo de combustível pela aeronave correlacionando com o preço do combustível de aviação no mês de referência do voo. Além disso, aspectos ligados a manutenção e sistema de calibração que possam garantir melhor

desempenho das aeronaves e fazendo uma comparação com seu desempenho em um período maior de tempo.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Aviação Civil. ANAC. Anuário do Transporte Aéreo. Agência Nacional de Aviação Civil, 2014c.

Agência Nacional de Aviação Civil. ANAC. Lei de Criação da ANAC (Lei n° 11.182). Disponível em <https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/institucional> Acesso em 01/07/2021.

BRUECKNER, J. K. e ABREU, C. Airline fuel usage and carbon emissions: Determining factors. Journal of Air Transport Management, v. 62, p.10-17, 2017.

CHARNES, A., COOPER, W.W. e RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 1978.

CHEZÈ, B; GASTINEAU, P. e CHEVALLIER, J.; Forecasting world and regional aviation jet fuel demands to the mid-term (2025). Energy Policy, v. 39, n.9, p.5147-5158. 2011.

COOPER, W. W., SEIFORD, L. M. e TONE, K.; Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. 2nd Edition, Springer, New York, 2007.

COOPER, W. W., SEIFORD, L. M. e ZHU, J.; Data Envelopment Analysis: History, Model, and Interpretations. International Series in Operations Research & Management Science, New York, 1-39, 2011.

CUI, Q. e LI, Y. Evaluating energy efficiency for airlines: An application of VFB-DEA. Journal of Air Transport Management, v. 44-45, p.34-41, 2015.

JENSEN, L., YUTKO, B., Fuel burn reduction: How airlines can save costs, 2014.

KAO, C. Efficiency decomposition in network data envelopment analysis: A relational model. European Journal of Operational Research, 2009.

KHADILKAR, H. e BALAKRISHNAN, H.; Estimation of aircraft taxi-out fuel burn using flight data recorder archives, 2011.

MORIARTY, P. e HONNERY, D. Energy efficiency: lessons from transport. Energy Policy, 2012.

TONE, K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research 130. 2001. 498-509.

ANÁLISE PARA VIABILIDADE DE UMA AEROTRÓPOLE: APLICAÇÃO PARA SUBSIDIAR DECISÕES NO CENÁRIO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE FORTALEZA/CE

Fabiano Rocha*
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Giovanna Miceli Ronzani Borille**
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

Fábio Rocha Barbosa***
Universidade Federal do Piauí - UFPI

*: fabiano.rocha@ifce.edu.br
**: ronzani@ita.br
***: fabiorocha@ufpi.edu.br

PAPER ID: SIT131

RESUMO

A Aerotrópole consiste em um centro comercial multimodal, centrado a partir do aeroporto e que influencia seu entorno com negócios relacionados à aviação. Observa-se a grande relevância das receitas não aeronáuticas no contexto dos aeroportos privatizados, sendo um ambiente propício à implantação do modelo de uma Aerotrópole. O objetivo é analisar a viabilidade de implantação de uma Aerotrópole em aeroportos privatizados, tomando como estudo de caso o Aeroporto Internacional de Fortaleza/CE. Utilizou-se a técnica Análise Envoltória de Dados (DEA) que, assim como outras técnicas, permite o alcance de metas para melhoria dos índices das variáveis analisadas, sendo estas variáveis: número de companhias aéreas que operam no aeroporto, tamanho total do local do aeroporto, movimentação de passageiros pagos (2018), movimentação de aeronaves - pousos e decolagens (2018) e receitas não aeronáuticas (2018). Pretende-se preencher uma lacuna na literatura existente sobre a falta de utilização da técnica DEA para analisar a viabilidade de implantação de uma Aerotrópole em aeroportos privatizados. As variáveis estão relacionadas aos critérios fundamentais de um Plano Diretor para a implantação de uma Aerotrópole. São analisados dois cenários: I - entradas: o número de companhias aéreas que operam no aeroporto e o tamanho total sítio aeroportuário; saídas: movimentação de passageiros pagos (2018), e movimentação de aeronaves - pousos e decolagens (2018); II - entrada: tamanho total do sítio aeroportuário; saídas: movimentação de passageiros pagos (2018), movimentação de aeronaves - pousos e decolagens (2018) e o valor total das receitas não aeronáuticas (2018). Os resultados indicam que a eficiência relativa do Aeroporto Internacional de Fortaleza/CE no Cenário 1 é de 93,97%, sendo mais eficiente que o Cenário 2, que apresentou um percentual de 71,7; a média dos resultados é de 82,84%. Intervenções estratégicas específicas serão necessárias se a implantação da Aerotrópole estiver prevista neste cenário.

Palavras-chave: Aerotrópole, Aeroportos, Privatizados, Receitas não-aeronáuticas.

1. INTRODUÇÃO

Os aeroportos vivem uma mudança de conceito em sua utilização nos últimos 30 anos, tornando-se núcleos que geram novas possibilidades e modelos de negócios ao redor do mundo (Kasarda & Lindsay, 2012). Estes equipamentos urbanos estão imersos em um contexto de necessidade crescente de múltiplas formas de conectividade.

Verifica-se a importância de desenvolver um estudo específico de um modelo de aeroporto dentro das exigências atuais de conectividade para um ambiente produtivo nos centros urbanos (Khanna, 2016). Aeroportos e modais a eles associados tornam-se estratégicos no desenvolvimento de cadeias de negócios que surgem por impulso desta conectividade logística. Surge então um novo conceito para as cidades que nascem a partir do aeroporto (Kasarda, 2016).

Segundo Kasarda (2013), o aeroporto deve se tornar uma cidade, assim uma nova harmonia surgirá entre os centros urbanos e a Aerotrópole. O desenvolvimento prático deste recente conceito de aeroporto-cidade passa por análise sistemática de alguns critérios básicos de implantação. Dependendo da perspectiva de análise, alguns destes critérios variam, mas praticamente todas as concepções de Aerotrópole estão ligadas ao cenário de aeroportos privatizados e receitas não-aeronáuticas (Kasarda & Lindsay, 2012; Lopes & Borille, 2016). O estudo realizado por Kasarda e Canon (2016), determina critérios fundamentais relacionados à eficiência da construção e implantação do Plano Diretor de uma Aerotrópole, e é utilizado neste artigo para nortear a escolha das variáveis do modelo de análise.

Pesquisas sobre a Aerotrópole são realizadas ao redor do mundo desde o desenvolvimento dos primeiros conceitos sobre este tema, trazendo contribuições a partir de perspectivas diversas de análise (Kasarda & Appold, 2014). Trabalhos sobre análise comparativa de competitividade, padrões de nível de serviço, índices de sustentabilidade e pesquisa sobre impacto das receitas não-aeronaúticas são alguns dos que podem ser citados (Chung & Lee & Jang, 2017; Charles *et al*, 2007; Wang & Chou & Yeo, 2013).

Entretanto, há escassez de estudos sobre decisões estratégicas para implantação da Aerotrópole a partir da análise de eficiência relativa dos indicadores ligados à critérios fundamentais do Plano Diretor de uma Aerotrópole. E sendo feita dentro do contexto de um aeroporto recém-privatizado, onde as receitas não-aeronáuticas são amplamente impulsionadas (Olariaga, 2015; Orth & Frei & Weidmann, 2015). Este trabalho apresenta uma proposta de metodologia para servir de contribuição às pesquisas que exploram a análise de viabilidade da implantação de uma Aerotrópole. Considerando regiões semelhantes às apresentadas nesta pesquisa.

Neste estudo analisa-se o potencial desenvolvimento de uma Aerotrópole na região de Fortaleza (capital do Ceará, localizada na região Nordeste do Brasil), no cenário pós-concessão para a empresa alemã Fraport (FRAPORT, 2018). Desta forma, tem-se as seguintes questões de pesquisa: (i) Qual o cenário pós-privatização do Aeroporto Internacional de Fortaleza em relação aos critérios básicos para a viabilidade do modelo de uma Aerotrópole ser implantada a partir deste aeroporto? (ii) Quais decisões estratégicas devem ser tomadas para que este aeroporto possa prosseguir para o modelo de uma Aerotrópole?

A escolha do Aeroporto de Fortaleza torna-se oportuna pois seu tempo de concessão (30 anos) à empresa Fraport está praticamente sobreposto ao tempo de execução do maior projeto de desenvolvimento sócio-econômico do estado do Ceará, através da Plataforma Ceará2050. Este visa planejar e executar ações de desenvolvimento em todo o estado pelos próximos 30 anos (FRAPORT, 2018; ANAC, 2020; CEARA2050, 2019).

O objetivo geral deste artigo é identificar fatores importantes para a viabilidade da implantação de uma Aerotrópole em aeroportos privatizados. Os objetivos específicos são: a)

analisar a viabilidade de implantação de uma Aerotrópole utilizando o Aeroporto Internacional de Fortaleza como estudo de caso; b) descrever e aplicar a ferramenta Análise Envoltória de Dados (DEA) para verificação do cenário atual do Aeroporto Internacional de Fortaleza em relação aos padrões de eficiência do modelo de uma Aerotrópole; c) identificar quais movimentos organizacionais poderiam ser adotados para a implantação do modelo de uma Aerotrópole no Aeroporto Internacional de Fortaleza.

A seguir apresentam-se os fundamentos teóricos e metodológicos para o desenvolvimento desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aerotrópole

A economia mundial no século XXI apresenta demanda crescente por conectividade que possibilite a geração de negócios que rompem fronteiras da distância e tempo, estabelecendo assim alianças lucrativas (Khanna, 2016). Neste cenário surgem novos modelos de relações comerciais, pautados em contatos que nascem a partir de infraestruturas multimodais. Tais estruturas tornam possível a transferência, além de pessoas e cargas, também de novas idéias de negócios (Khanna, 2016; Kasarda, 2013).

Surge uma relação inversa, com a cidade sendo remodelada a partir do aeroporto, e não mais o aeroporto sendo entregue a uma cidade - esta é a essência do conceito de Aerotrópole (Kasarda, 2013). Ainda conforme Kasarda (2016), uma Aerotrópole tem sua definição relacionada a formação de uma sub-região metropolitana que tem sua infraestrutura, uso da terra e economia centrados em um aeroporto. Entende-se assim que a multimodalidade é diretamente relacionada a magnitude da conectividade proporcionada pela Aerotrópole (Martins & Pinheiro & Santo Junior, 2016).

O conceito de aeroporto-cidade surgiu no contexto brasileiro de forma mais efetiva a partir do cenário de pós-privatizações, principalmente, porque nesta nova conjuntura as receitas não-aeronáuticas apresentam relevância dentro do ambiente de negócios da aviação, chegando em alguns casos representar até 50% da receita operacional dos aeroportos (Olariaga, 2015).

Estas receitas foram impulsionadas pela queda de tarifas aeroportuárias, como resultado da influência recebida pela desregulamentação da aviação nos Estados Unidos e em outros países (Martins & Pinheiro & Santo Junior, 2016). Nota-se também que os aeroportos privatizados têm o foco evidente em impulsionar atividades comerciais dentro e ao redor do aeroporto, criando-se então o cenário de impulso das receitas não-aeronáuticas (Almeida & Borille, 2017).

O conceito de Aerotrópole também pode ser entendido a partir da concepção de três dimensões interdependentes (Kasarda, 2016): (i) sua forma funcional - soluções para empresas e viajantes aéreos mais frequentes; (ii) sua forma espacial - desenvolvimento físico dentro e ao redor do aeroporto / infraestrutura para demandas futuras (Neufville & Odoni, 2013); e (iii) suas conexões e ligações - todos os possíveis elos proporcionados pela infraestrutura de transporte interna e externa (Khanna, 2016).

Ainda, a Aerotrópole pode ser assim caracterizada: (i) desenvolvida a partir do aeroporto, (ii) atrai um ambiente complexo ao seu redor, por ser uma impulsionadora de novos negócios, novas conexões e possibilidades comerciais e sociais a serem implementadas, (iii) ambiente de negócios e suas conexões evoluem e geram novos níveis de conectividade e (iv) atraem novos *players*, impactando novos interessados e tornando ainda mais complexo (e comercialmente atrativo) o ambiente que configura este empreendimento aeroportuário (Kasarda & Canon, 2016).

O desenvolvimento da Aerotrópole vem sendo adotado em várias partes do mundo, como por exemplo: Holanda, Estados Unidos, Alemanha, Coreia do Sul, China e Emirados Árabes; muito impulsionado pela expansão do

transporte aéreo internacional no século XXI (Charles *et al*, 2007). Para eficiente implementação de uma Aerotrópole, o seu Plano Diretor e demais planejamentos setoriais devem ser desenvolvidos de forma integrada conforme apresentado na Figura 1 (Kasarda, 2016):

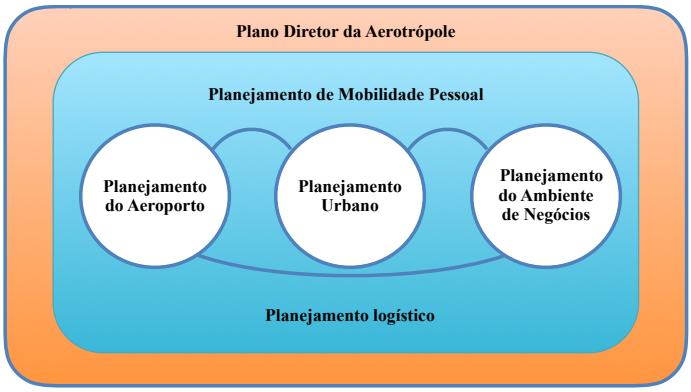


Figura 1 Planejamento Integrado da Aerotrópole. Fonte: adaptado de Kasarda, 2016.

Alguns estudos mencionam sobre as características fundamentais de uma Aerotrópole, designando critérios básicos a serem atendidos para sua implantação, existência e sustentabilidade a longo prazo (Kasarda & Lindsay, 2012; Charles *et al*, 2007; Wang & Chou & Yeo, 2013; Lopes & Borille, 2016; Kasarda, 2013; Kasarda & Canon, 2016; Kasarda & Appold, 2014).

Kasarda e Canon (2016), identificaram os seguintes elementos comuns ao âmbito do planejamento de uma Aerotrópole, que devem ser priorizados no momento da elaboração de um Plano Diretor, são eles: (i) demanda do mercado para o comércio aéreo, (ii) suficiência e eficiência da conectividade aérea e terrestre, (iii) desejos e necessidades de clientes e partes interessadas (*stakeholders*), (iv) a gestão do desenvolvimento imobiliário comercial e (v) a força para atrair investidores e investimentos.

Um adequado Plano Diretor para implantação de uma nova Aerotrópole está diretamente relacionado a estes critérios supracitados independente do ambiente social, econômico, ambiental e político, segundo Kasarda e Canon (2016). Entretanto a natureza futurista, de um projeto desta magnitude, torna-o passível de mudanças indesejadas dos fatores ambientais, sociais e tecnológicos, no longo prazo (Kasarda, 2013), e que podem tornar inviabilizada a Aerotrópole (Kasarda, 2016; Charles *et al*, 2007). Fortalece-se assim a necessidade de um planejamento integrado das várias dimensões envolvidas.

2.2 Análise Envoltória de Dados (DEA)

A Análise Envoltória de Dados, doravante também chamada DEA (DEA - *Data Envelopment Analysis*), é uma abordagem não-paramétrica que analisa o confronto entre variados produtos (saídas) e insumos (entradas) pertencentes a uma mesma unidade produtiva. Medindo basicamente a eficiência produtiva destas unidades. Pode ser também vista como uma técnica que permite avaliação de eficiência relativa, amplamente utilizada em análises comparativas e que permite a formação de fronteiras de eficiência de unidades produtivas (Casado & Souza, 2007; Périco & Santana & Rebelatto, 2017).

Esta técnica avalia o nível de eficiência relativa de unidades organizacionais independentes (comparando a um referencial estabelecido/calculado), permitindo confrontar entradas (*inputs*) e suas saídas (*outputs*). A técnica DEA foi elaborada por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), com o objetivo de aprofundar a análise das medidas de eficiência em unidades de produção homogêneas para apoio na tomada de decisão gerencial, e foi desenvolvida a partir de análises feitas sobre trabalhos anteriormente desenvolvidos por M. J. Farrell (Bezerra *et al*, 2017).

As unidades organizacionais (ou também chamadas unidades produtivas) analisadas na técnica DEA devem ser similares, respeitando a homogeneidade necessária para a comparação ser inequivocamente coerente. Analisando níveis de eficiência relativa em comparação a um modelo ideal, ou seja, um *benchmarking* (Olfat *et al*, 2016).

Torna-se então necessário elucidar, para este contexto, dois conceitos básicos a seguir: (i) **produtividade:** é a relação entre o quantitativo (ou o valor atribuído ao que é produzido), ou seja, a quantificação dos

resultados produtivos da unidade organizacional (*outputs*) e a quantificação (ou valor) dos insumos (*inputs*) que foram empregados na produção destas saídas; (ii) **eficiência:** capacidade de uma unidade produtiva em alcançar o melhor resultado possível com o mínimo de erros e/ou desperdício de insumos de sua produção (Merkert & Assaf, 2015).

Em casos de múltiplas entradas e saídas torna-se necessário a atribuição de pesos (v_i e u_r respectivamente) multiplicados aos valores destes *inputs* e *outputs* no cálculo da eficiência, como está abaixo representado nas equações (Bezerra *et al*., 2017):

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Saída virtual}}{\text{Entrada virtual}} \quad (1)$$

$$\text{Eficiência da unidade j} = \frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \ldots}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \ldots} \quad (2)$$

Em que:

(i) u_1 = o peso atribuído para o *output* 1; (ii) y_{1j} = montante do *output* 1 da unidade j; (iii) v_1 = peso atribuído para *input* 1; e (iv) x_{1j} = montante do *input* 1 para unidade j.

As principais literaturas sobre DEA, utilizam a nomenclatura de *Decision Making Units* (doravante chamadas DMUs) para determinar as unidades produtivas, entendo-as como unidades que serão alvo de análises e decisões pós aplicação da técnica de medida de eficiência relativa (Périco & Santana & Rebelatto, 2017). O modelo resumido da configuração básica de uma DMU pode ser visto na Figura 2:

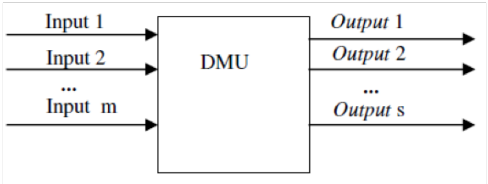


Figura 2 Elementos da DMU (*Decision Making Unit*). Fonte: Périco & Santana & Rebelatto, 2017.

Existem modelos diferentes de cálculos através da técnica DEA, proporcionando formas diferentes de abordagem dependendo da solução desejada pelo observador (Merkert & Assaf, 2015). Portanto pode-se destacar os dois principais modelos de DEA (Périco & Santana & Rebelatto, 2017; Souza & Scatena & Kehrig, 2016): (i) **Modelo CCR:** modelo que assume retorno constante de escala, ou seja, para cada aumento de *input* haverá um aumento proporcional de forma linear no valor de *output*, assim concebendo a escala como ótima; (ii) **Modelo BCC:** modelo que assume retornos variáveis de escala, portanto não assumindo proporcionalidade entre *inputs* e *outputs*, ou seja, os retornos podem ser crescentes, decrescentes e constantes.

Nesta pesquisa é utilizado o modelo BCC, em sua forma identificada como BCC Dual orientada para *inputs*, o mais indicado para casos em que há grandes diferenças no porte de organizações analisadas, assim como é desenvolvido, nesta pesquisa, com diferentes aeroportos (Bezerra *et al*, 2017).

Golany e Roll (1989) desenvolveram em seus estudos a seguinte sequência de passos a serem tomados para realização da análise utilizando a técnica DEA: (i) Definir e selecionar DMUs; (ii) Determinar os *inputs* e *outputs* pertinentes para devida avaliação da eficiência relativa das DMUs indicadas; e (iii) Aplicar modelos DEA e analisar resultados. Esta sequência de passos permite a implementação objetiva da técnica e é adotada neste estudo.

2.3 Síntese e contribuição

Os principais autores da Aerotrópole desenvolveram estudos sobre: as formas estruturais que caracterizam este modelo de aeroporto-cidade, urbanização de grandes cidades em harmonia com os serviços prestados pelo aeroporto, receitas não-aeronáuticas e sua relação com o modelo de Aerotrópole e demais modelos de aeroporto-cidade, a multimodalidade de transportes em harmonia com os serviços aeroportuários, dentre outros assuntos ligados a Aerotrópole. (Khanna, 2016; Lopes & Borille, 2016; Kasarda & Canon, 2016; Orth & Frei; Weidmann, 2015; Olariaga, 2015; Kasarda & Appold, 2014; Kasarda, 2013; Wang & Chou

& Yeo, 2013; Kasarda & Lindsay, 2012; Charles *et al*, 2007).

Observa-se também a respeito de autores sobre DEA a contribuição em estudos sobre eficiência relativa em organizações como instituições de ensino, hospitais e aeroportos (Périco & Santana & Rebelatto, 2017; Bezerra *et al*, 2017; Souza & Scatena & Kehrig, 2016; Casado & Souza, 2007; Merkert & Assaf, 2015; Olfat *et al*, 2016). Estes estudos trazem grandes contribuições para modelos organizacionais já estabelecidos, oportunizando análises para direcionamentos específicos de melhoria do desempenho organizacional.

Pretende-se, neste trabalho, preencher uma lacuna da literatura existente sobre os assuntos aqui tratados, onde nota-se a ausência de utilização da técnica DEA para analisar a viabilidade de implantação de uma Aerotrópole em aeroportos privatizados.

3. METODOLOGIA

Foi desenvolvida neste trabalho uma pesquisa aplicada, do ponto de vista da natureza da investigação realizada, pois pretende-se gerar conhecimento para a aplicação prática no que diz respeito a subsidiar possíveis tomadas de decisões (Prodanov & Freitas, 2013). Ainda, considera-se ser, do ponto de vista de seus objetivos, uma pesquisa exploratória pois trata-se também de um estudo de caso que procura desenvolver mais informações sobre o assunto tratado (Prodanov & Freitas, 2013).

O presente estudo utiliza como técnica de tratamento de dados a mencionada Análise Envoltória de Dados (DEA), com aplicação fundamentada no modelo que Golany e Roll (1989) desenvolveram em seus estudos, e mencionado no item 2.2 deste trabalho.

É aplicado o modelo DEA BCC na sua forma Dual para assim obter informações precisas sobre a situação de aeroportos privatizados em relação aos critérios de implantação de uma Aerotrópole, conforme os cinco itens fundamentais do Plano Diretor indicado por Kasarda e Canon (2016).

A Figura 3 apresenta o procedimento de análise do presente trabalho:

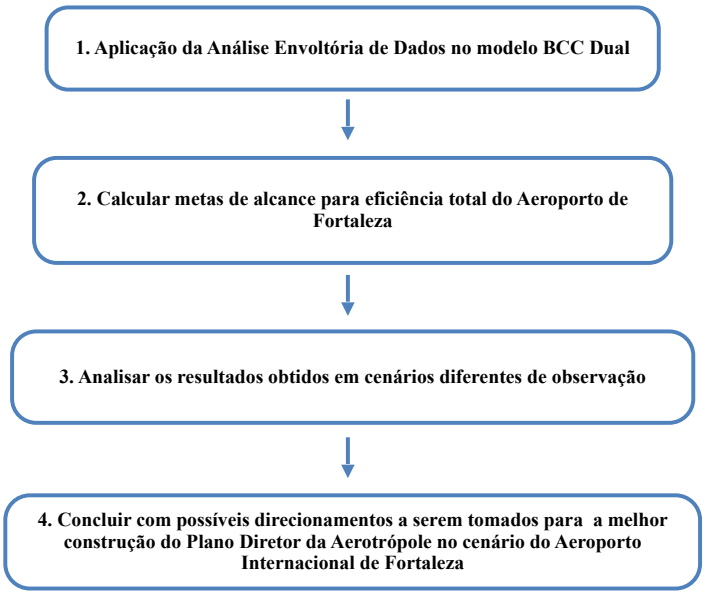


Figura 3 Fluxograma do Modelo de Análise.

Os aeroportos privatizados que são considerados como DMUs para a análise e aplicação da técnica DEA neste estudo, estão relacionados a seguir: Fortaleza/CE, Porto Alegre/RS, Natal/RN, Florianópolis/SC, Salvador/BA, Confins/BH, Brasília/DF, Galeão/RJ, Guarulhos/SP e Viracopos/SP. Entendendo que o Aeroporto de Fortaleza/CE é o objeto do estudo de caso, e é comparado aos demais aeroportos desta relação na análise de eficiência relativa. São propostos dois cenários de investigação, utilizando variáveis alinhadas aos critérios fundamentais de implantação da Aerotrópole (Kasarda & Canon, 2016):

A. **Cenário 1:** ***Input1*** - Número de companhias aéreas operando no aeroporto (Critério: Desejos e necessidades de clientes e partes interessadas); ***Input2*** - Sítio aeroportuário - em m²/Complexo imobiliário do aeroporto (Critério: A gestão do desenvolvimento imobiliário comercial e força para atrair investidores e investimentos); ***Output1*** - Movimentação de passageiros/ano - Passageiros pagos: embarque e desembarque (Critério: Demanda do mercado para o comércio aéreo); ***Output2*** - Movimentação

aeronaves/ano - Pousos e decolagens (Critério: Conectividade aérea e terrestre).

B. **Cenário 2: *Input*** - Sítio aeroportuário - em m²/Complexo imobiliário do aeroporto (Critério: A gestão do desenvolvimento imobiliário comercial e força para atrair investidores e investimentos); ***Output1*** - Movimentação de passageiros/ano - Passageiros pagos: embarque e desembarque (Critério: Demanda do mercado para o comércio aéreo); ***Output2*** - Movimentação aeronaves/ano - Pousos e decolagens (Critério: Conectividade aérea e terrestre); ***Output3*** - Receitas Não Aeronáuticas (Critério: Desejos e necessidades de clientes e partes interessadas).

De forma geral, pretende-se contribuir com subsídios relevantes para tomada de decisões estratégicas a respeito da elaboração de um Plano Diretor para implantação de uma Aerotrópole em um aeroporto privatizado.

4. RESULTADOS

Os dados foram colhidos mediante uma pesquisa junto aos sítios eletrônicos de cada um dos aeroportos e da ANAC. As movimentações de passageiros/ano e de aeronaves/ano (*output1* e *output2* respectivamente), assim como as informações sobre receitas não-aeronáuticas (*output3*), foram referentes ao ano de 2018.

O modelo DEA BCC Dual foi implementado nos cálculos para tratamento dos dados coletados para a pesquisa. As eficiências são medidas entre os valores 0 a 1, ou em porcentagem 0 a 100%, onde 1 significa a eficiência total alcançada pela DMU. Conforme mencionado cada DMU é um aeroporto da amostra delimitada.

Os cálculos foram desenvolvidos para o Cenário 1 e Cenário 2. O Cenário 1 mostrou que 5 (cinco) DMUs da amostra têm eficiência total para estas entradas e saídas utilizadas na análise. Resultou-se que o Aeroporto Internacional de Fortaleza está abaixo da eficiência total diante dos parâmetros escolhidos e o tipo de comparação implementada. Esta DMU ficou bem próxima da fronteira de eficiência ideal (que é 100%), conforme técnica DEA, obtendo medição de 93,97% de eficiência relativa. Obteve-se então que os alvos para os *outputs1* e *2,* respectivamente quantidades da Movimentação de passageiros e Movimentação aeronaves - Pousos e decolagens*,* devem crescer em 26,63% (*output1*) e 65,69% (*output2*) em relação aos valores atuais, para que o aeroporto seja totalmente eficiente.

Neste Cenário 2, onde tem-se uma entrada e três saídas, as eficiências calculadas das DMUs, de um modo geral, diminuíram. Apenas 2 (duas) DMUs estão na fronteira de eficiência, ou seja atingiram 100% de eficiência relativa calculada. Este novo contexto mostra que o Aeroporto de Fortaleza tem eficiência relativa menor que a obtida no Cenário 1, e neste caso fica com uma folga de 28,3 pontos percentuais de distância da eficiência total. Distância quase 5 vezes maior que no Cenário 1.

Observando os alvos para os *outputs* deste Cenário 2, considerando que o *input* Sítio Aeroportuário mantenha-se inalterado, tem-se a seguinte situação: (i) A Movimentação de passageiros precisa crescer 24,32% em relação ao seu valor atual, para a melhoria de eficiência neste cenário; (ii) A Movimentação aeronaves - Pousos e decolagens deve crescer 48,36% para a melhoria de eficiência do aeroporto neste cenário; (iii) As Receitas não-aeronáuticas tem como alvo o crescimento de 101,6%, ou seja, mais que dobrar o valor da amostra analisada, para que o aeroporto, neste contexto tenha a eficiência relativa máxima.

Tais valores indicam de forma quantitativa como esta DMU pode atingir a fronteira de eficiência dentro deste cenário de pesquisa. A eficiência relativa calculada apesar de ter sido menor que no Cenário 1, foi significativa, sendo, no Cenário 2, 71,7% da eficiência total almejada.

5. CONCLUSÕES

A Aerotrópole é um modelo moderno de aeroporto que expande os negócios ligados as suas atividades aeronáuticas para o seu entorno. Com base neste conceito de aeroporto-cidade concebido por Kasarda (2013), surge a motivação para analisar a viabilidade de implantação de uma Aerotrópole em aeroportos brasileiros privatizados. Assumiu-se como estudo de caso a situação em que se encontra o Aeroporto Internacional de Fortaleza, quando comparado a outros aeroportos brasileiros, e em relação a critérios prioritários para a implantação de uma Aerotrópole, com amostras do ano de 2018. A seguir é respondida a questão de pesquisa (i), a respeito dos dois cenários propostos para análise.

A partir do Cenário 1 pode-se afirmar que o Aeroporto Internacional de Fortaleza, para os fatores envolvidos (*inputs* e *outputs*), obteve um resultado de proximidade da eficiência ideal em uma aplicação da técnica DEA com variáveis relacionadas aos critérios de implantação de uma Aerotrópole. A respeito da movimentação de aeronaves (*output2*), diante dos insumos disponíveis, a folga de ineficiência foi quase 2,5 vezes a folga relacionada ao *output1*. Esta situação requer medidas estratégicas que transformem a realidade dos resultados deste indicador, como melhor gerenciamento de utilização das pistas (pouso, decolagem e taxi), a fim de melhorar os níveis de resposta desta variável organizacional (*output2*) e alcançar parâmetros adequados de uma Aerotrópole.

O Cenário 2 proposto na análise apresentou redução de resultado geral da eficiência relativa do Aeroporto Internacional de Fortaleza. As metas de crescimento das 3 (três) variáveis de saída podem ser consideradas altas, observando-as em conjunto. Pode-se afirmar que o Aeroporto Internacional de Fortaleza tem satisfatória exploração de insumos disponíveis para impulsionar sua movimentação de passageiros pagos. Entretanto, há espaço para melhoria diante das entradas analisadas.

Conclui-se que a exploração do Sítio Aeroportuário será necessária para a melhoria de eficiência que atende os critérios de uma Aerotrópole. Encerrando as conclusões sobre o Cenário 2, entende-se que ações agressivas para melhoria na exploração de receitas não-aeronáuticas são determinantes para melhorar a eficiência do Aeroporto Internacional de Fortaleza neste específico contexto de pesquisa. Torna-se necessário a implementação de projetos estratégicos que ampliem a parceria para atividades comerciais dentro e fora do aeroporto. Estas parcerias podem produzir novos negócios de forma contínua, iniciando o ambiente comercial que alimenta-se dos serviços aeroportuários. Tal situação caracteriza um dos pilares básicos da Aerotrópole, que é a exploração consistente de receitas não-aeronáuticas. Portanto, as medidas estratégicas sugeridas nos cenários 1 e 2 respondem a questão (ii) da problemática desta pesquisa.

O Aeroporto Internacional de Fortaleza apresentou, nesta pesquisa, resultados relevantes com respeito a capacidade de gerenciar a movimentação de passageiros e, alinhado a este fato, pode-se entender que existe oportunidade de exploração de serviços comerciais para o público que utiliza o ambiente do aeroporto e suas adjacências, portanto é oportuno um modelo de aeroporto vocacionado a exploração de receitas comerciais. Examinando em conjunto, ambos os cenários propostos, o Aeroporto Internacional de Fortaleza ficou com a média de 82,84% de eficiência. Isto mostra potencial para continuidade de estudos e ações de implementação de um modelo de Aerotrópole neste aeroporto, considerando os parâmetros estudados.

Entende-se também que a conjuntura de pós-privatização em um aeroporto pode ser significativamente favorável à implantação de uma Aerotrópole, pelo menos dentro dos parâmetros aqui estudados. Pode-se dizer então que os objetivos geral e específicos foram atendidos nesta análise realizada e conclusões apresentadas, dado que a viabilidade da implantação de uma Aerotrópole em aeroporto

privatizado foi estudada através da aplicação da técnica DEA.

Recomenda-se, para fins de aprofundamento no assunto, um estudo que envolva informações de atratividade de investimentos, no ambiente da futura Aerotrópole; e investimentos do poder público que impactem o Plano Diretor da cidade de forma positiva para a construção de uma Aerotrópole. Acrescenta-se a estas recomendações a possibilidade de análise de mais cenários, com variáveis que não foram tratadas nesta pesquisa, mas que são inerentes ao modelo de Aerotrópole, como a importante análise da estrutura multimodal em torno do aeroporto.

Referências

ANAC. (2020, Jan 20) *Agência Nacional de Aviação Civil . Aeroportos concedidos.* 2020. Acesso em: 20 Jan, 2020, de https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/concessoes/aeroportos-concedidos

Almeida, A. A.; Borille, G. M. R. (2017) Investigação sobre a relação entre as características do terminal de passageiros aeroportuário e as receitas não aeronáuticas. *Revista Transportes, ANPET.* São Paulo.

Bezerra, S. de A.; Santos, F. J. dos; Pinheiro, P. R.; Barbosa, F. R. (2017). *Dynamic Evaluation of the Energy Efficiency of Environments in Brazilian University Classrooms Using DEA*. Sustainability, [s.l.], v. 9, n. 12, p.2373-2386. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/su9122373.

Casado, F. L.; Souza, A. M. (2007). Análise Envoltória de Dados: conceitos, metodologia e estudo da arte na Educação Superior. *Revista Sociais e Humanas: Universidade Federal de Santa Maria | Centro de Ciências Sociais e Humanas*, v. 20, n. 1, p.59-71, Santa Maria/RS.

CEARA2050. Governo do Estado do Ceará. (2019). *Ceará 2050 - Juntos pensando o futuro: Plataforma Ceará 2050*. Acesso em: 20 Dez, 2019, de http://www.ceara2050.ce.gov.br

Charles, M. B.; Barnes, P.; Ryan, N.; Clayton, J. (2007) *Airport futures: Towards a critique of the aerotropolis model. Futures*, [s.l.], v. 39, n. 9, p.1009-1028. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2007.03.017.

Charnes, A.; Cooper, W.W.; Rhodes, E. (1978) Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal Of Operational Research*, [s.l.], v. 2, n. 6, p.429-444. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8.

Chung, T. W.; Lee, Y. J.; Jang, H. M. (2017) A Comparative Analysis of Three Major Transfer Airports in Northeast Asia Focusing on Incheon International Airport Using a Conjoint Analysis. *The Asian Journal Of Shipping And Logistics*, [s.l.], v. 33, n. 4, p.237-244. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.12.007.

FRAPORT Brasil - Fortaleza. (2018) *Aeroporto de Fortaleza.* Acesso em: 05 Abr, 2018, de http://www.fortaleza-airport.com.br/pt

Golany, B; Roll, Y. (1989) An application procedure for DEA. Omega, [s.l.], v. 17, n. 3, p.237-250. *Elsevier BV*. http://dx.doi.org/10.1016/0305-0483(89)90029-7.

Kasarda, J. D. (2016) *Aerotropolis.* The University of North Carolina at Chapel Hill. Encyclopedia of Urban and Regional Studies.

Kasarda, J. (2013) *A tale of two airports*. Acesso em: 29 Out, 2019, de http://aerotropolisbusinessconcepts.aero/wp-content/uploads/2014/08/5_TaleOfTwoAirports2.pdf

Kasarda, J. D.; Appold, S. J. (2014) *Planning a Competitive Aerotropolis.* Acesso em: 20 Out, 2019, de http://aerotropolisbusinessconcepts.aero/wp-

content/uploads/2015/05/PlanningACompetitiveAerotropolis.pdf

Kasarda, J. D.; Canon, M. H. (2016) Creating an Effective Aerotropolis Master Plan. *Regional Economic Review*, Carolina do Norte, EUA, v. 5, n. 1, p.1-31.

Kasarda, J. D.; Lindsay, G. (2012). *Aerotropóle: o modo como viveremos no futuro.* Tradução Sieben Gruppe. São Paulo: DVS editora.

Khanna, P. (2016) *Connectography: mapping the future of global civilization.* Mapping the Future of Global Civilization. New York: Random House.

Lopes, M. C.; Borille, G. M. R. (2016). The chanllenges of aerotropolis in the post-privatization scenario: a case of study of brazilian airports. *SITRAER, Simpósio de Transporte Aéreo*. São Luís, MA.

Martins, C. J. V.; Pinheiro, L. V. R.; Santo Junior, R. A. do E. (2016) *Canais de demanda, de acesso e de uso de informações estratégicas no ambiente de Aertotrópole*. In: Encontro Nacional de Pesquisa em Ciência da Informação (XVII ENANCIB), 17., Bahia. Anais [...] . Salvador: Enancib. p. 1 - 17.

Merkert, R.; Assaf, A. G. (2015) Using DEA models to jointly estimate service quality perception and profitability – Evidence from international airports. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, [s.l.], v. 75, n. 1, p.42-50. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.03.008.

Neufville, R. de; Odoni, A. R. (2013) *Airport systems: planning, design, and management.* 2. ed. New York: Mcgraw-hill Education. 782 p.

Olariaga, O. D. (2015) Desarrollo reciente y relevancia actual de los ingresos comerciales aeroportuarios. *Estudios Gerenciales*, Bogotá, Colombia, v. 31, n. 137, p.393-402. Acesso em: 19 Set, 2019, de www.elsevier.es/estudios gerenciales

Olfat, L.; Amiri, M.; Soufi, J. B.; Pishdar, M. (2016) A dynamic network efficiency measurement of airports performance considering sustainable development concept: A fuzzy dynamic network-DEA approach. *Journal Of Air Transport Management*, [s.l.], v. 57, n. 1, p.272-290. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.08.007.

Orth, H.; Frei, O.; Weidmann, U. (2015) Effects of non-aeronautical activities at airports on the public transport access system: A case study of Zurich Airport. *Journal Of Air Transport Management*, [s.l.], v. 42, n. 1, p.37-46. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.07.011

Périco, A. E.; Santana, N. B.; Rebelatto, D. A. do N. (2017) Eficiência dos aeroportos internacionais brasileiros: uma análise envoltória de dados com bootstrap. *Gestão & Produção*, [s.l.], v. 24, n. 2, p.370-381. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x1810-15

Prodanov, C. C.; Freitas, E. C. de. (2013). *Metodologia do Trabalho Científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.* 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale. 274 p.

Souza, P. C. de; Scatena, J. H. G.; Kehrig, R. T. (2016). Aplicação da Análise Envoltória de Dados para avaliar a eficiência de hospitais do SUS em Mato Grosso. *Physis: Revista de Saúde Coletiva*, [s.l.], v. 26, n. 1, p.289-308. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s0103-73312016000100016

Wang, Y.; Chou, C.; Yeo, G. (2013). Criteria for Evaluating Aerotropolis Service Quality. The Korean Association of Shipping and Logistics, Inc. Production and hosting by Elsevier B.V. Inc. *The asian Journal of shipping and logistics*, Volume 29, Number 3, pp.395-414.

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE DETECÇÃO ATRAVÉS DE CÂMERAS EMBARCADAS EM VANTS NO PROCESSO DE DETECTAR E DESVIAR DE OUTRA AERONAVE

Vinícius Maurício de Almeida, Paulo Sergio Cugnasca
Universidade de São Paulo (USP), Escola Politécnica (Poli)

*** Corresponding author e-mail address**: viniciusmdea@gmail.com

PAPER ID: SIT226

RESUMO

O número de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), bem como o seu uso, vêm aumentando consideravelmente nos últimos anos. Porém, a sua inserção em um espaço aéreo não segregado pode se tornar uma ameaça de colisão com as demais aeronaves que compartilham o mesmo espaço aéreo. Para se evitar colisões, o processo utilizado atualmente tem o nome de s*ense and avoid*, pois consiste de duas etapas: a detecção (*sense*) de outra aeronave em rota de colisão e o desvio (*avoid*) para evitar a rota de colisão encontrada. Cada uma dessas etapas pode ser alcança de diversas maneiras, seja utilizando-se uma técnica específica de desvio, seja alterando-se o sensor ou o algoritmo de detecção associado a esse sensor. Este trabalho tem como foco a primeira etapa, analisando-se o processo de detecção de outra aeronave e utilizando-se de três diferentes combinações de sensores: a visão binocular, que consiste na utilização de duas câmeras visuais trabalhando em conjunto; a câmera de profundidade; e a câmera de profundidade em conjunto com a câmera visual. Também são analisados testes que utilizaram técnicas de fusão dos sensores descritos, os quais utilizam dois ou três sensores trabalhando em conjunto para a detecção de outra aeronave com possibilidade de colisão como o VANT. Para grupo de sensores foram analisados e testado diversos tipos de algoritmos de detecção. Os testes foram realizados por meio do AirSIM, um simulador de veículos não tripulados. As análises dos algoritmos foram feitas verificando-se a taxa de detecção e o erro da posição da aeronave calculado pelo algoritmo considerando-se a posição real da aeronave detectada. No final, chega-se a um resultado no qual detecta-se a aeronave em rota de colisão com o VANT em 100% dos casos testados, com erro médio 20 metros entre a posição detectada e a posição real da aeronave

Keywords: VANTs, UAVs, s*ense and avoid*, visão computacional, detecção.

1. INTRODUÇÃO

Devido à sua grande versatilidade, os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) vêm ganhando diversas aplicações, o que impulsiona o aumento do número destes veículos. Segundo estimativas da FAA (FAA - Federal Aviation Administration 2021) haverá um crescimento entre 9% a 44% no número de VANTs no espaço aéreo americano no período de 2020 a 2025.

Porém, a inserção desses veículos no espaço aéreo que não seja segregado pode se tornar uma ameaça às demais aeronaves que compartilham o mesmo espaço, pois permite o surgimento de cenários de risco de colisões entre elas. Para garantir que a inserção ocorra de modo seguro, é necessário garantir que esses veículos tenham capacidade de evitar colisões de forma similar ou superior a veículos com pilotos embarcados.

Pesquisas têm sido conduzidas visando à criação desta habilidade nos VANTs por meio de uma técnica chamada de *sense and avoid*, que consiste de duas etapas: a detecção da aeronave em risco de colisão (chamada de *sense*) e a criação e execução de uma rota que permita desviá-la da colisão (chamada de *avoid*). Ambas as etapas podem ser executadas de diversas maneiras, seja alterando o sensor, seja alternando o algoritmo de desvio utilizado.

Este trabalho tem como foco a etapa de detecção. Nele foram analisados três diferentes grupos de sensores para detectar a posição da aeronave em risco de colisão: a detecção através da visão binocular, que consiste em duas câmeras visuais trabalhando em conjunto; a detecção por meio de uma câmera de profundidade; e a detecção mista, que utiliza a câmera de profundidade trabalhando em conjunto com uma câmera visual. Em cada grupo de sensores foram analisados diversos algoritmos de visão computacional, comparando a precisão da posição calculada para a aeronave em rota de colisão com sua posição real, além da porcentagem de detecções corretas obtidas. Também foram feitos testes utilizando dois ou mais grupos de sensores trabalhando em conjunto, criando uma detecção for fusão de sensores.

Os testes foram realizados utilizando-se o AirSim, um simulador de veículos não tripulados. Ao final das simulações foram obtidas técnicas que detectam a aeronave em 100% das imagens nas quais ela está presente com erro de meio de 20 metros em relação a sua posição real.

2. DETECÇÃO DE OBJETOS EM RISCO DE COLISÃO POR VANTS

A detecção de conflito por *drones* é um problema que vem sendo amplamente pesquisado nos últimos anos. Existem várias maneiras realizá-la, podendo-se alterar o tipo de sensor ou de algoritmo utilizado. Em (Yu and Zhang 2015), (Lacher, Maroney, and Zeitlin 2007), (Cappello et al. 2015) é descrita uma série de sensores que podem ser utilizados para detecções por aeronaves. Esses sensores são divididos em dois diferentes tipos de detecção: a colaborativa, na qual a identificação de colisão é feita por meio de troca de informações entre as aeronaves, e a não colaborativa, na qual uma aeronave identifica objetos usando somente dados oriundos de seus próprios sensores, sem a necessidade de comunicação externa.

2.1. Detecção colaborativa

As detecções colaborativas correspondem aos modelos mais confiáveis, pois neste tipo de detecção não é necessário identificar a posição da aeronave, apenas ler e interpretar os dados enviados por ela, os quais contêm informações sobre sua posição, direção e velocidade. Dentre esses equipamentos utilizados neste modelo de detecção estão incluídos o *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B), o *Traffic Alert and Collision Avoidance System* (TCAS) (FAA 2011), e o mais recente, *Airborne Collison Avoidance System* (ACAS) (Eurocontrol 2017), que contém uma versão para veículos não tripulados: o ACAS-Xu.

Em (Kuchar 2005) é feita uma análise de aspectos de segurança sobre a aplicação do TCAS como sistema de prevenção de colisão no VANT Global Hawk. Este sistema é capaz de identificar aeronaves equipadas com transponder por intermédio de troca de informações entre elas. Kuchar apresenta uma análise dividida em duas fases: a primeira fase, chamada de *loop* externo, utiliza-se de uma

árvore de falhas para verificar situações que levam um VANT a um cenário de colisão; a segunda fase, chamada de *loop* interno, implementa simulações com a técnica de Monte Carlo para encontrar possíveis falhas que levariam o VANT a uma colisão com outras aeronaves. Nesses testes foram encontradas taxas de falhas com valores dentro dos permitidos pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*) e pela Eurocontrol (*European Organization for the Safety of Air Navigation*).

2.2. Detecção não colaborativa

Técnicas de detecção não colaborativa variam conforme o sensor utilizado, dentre elas a visão computacional está entre a mais estudada, por necessitar apenas de uma câmera, que é um sensor leve e barato. Dentre os trabalhos com *sense and avoid* utilizando câmeras, um dos primeiros resultados foi descrito por Ross (Ross et al. 2013), que utilizando o algoritmo de aprendizado supervisionado DAgger, o qual aprende a reconhecer a colisão e evitá-la a partir de dados de voos feitos por um piloto, possibilitou um VANT sobrevoar uma floresta, desviando-o de árvores presentes em seu caminho. Porém, seu algoritmo se limita apenas a desvio de obstáculos fixos.

Na mesma época, Pestana (Pestana et al. 2013) utilizou o algoritmo OpenTLD para reconhecer objetos em movimentos e rastreá-los. Sua técnica é utilizada com o foco em perseguição do objeto, porém sua detecção e rastreamento demonstram boa acurácia, perdendo o objeto em poucos momentos. Mas esta técnica se limita a objetos com baixas velocidades, diferentemente do ocorrido no espaço aéreo, e o seu trabalho, que tem o foco apenas no rastreamento, não inclui a detecção, sendo necessário ao usuário informar a localização inicial do objeto a ser rastreado.

Em uma pesquisa mais recente, Wu (Wu, Sui, and Wang 2017) utiliza um algoritmo para que um VANT reconheça aeronaves em movimento, tendo conseguido bons resultados, considerado o estado da arte para detecção de aeronaves. Seu algoritmo tem a detecção baseada em filtros de Kalman e duas fases distintas de escaneamento da imagem.

2.3. Fusão de sensores

Visando criação de um modelo que apresente a confiabilidade da detecção colaborativa, e a robustez da detecção não colaborativa, permitindo detectar aeronaves sem o sensor de comunicação, alguns autores propõem modelos híbridos de detecção, utilizando fusão de sensores.

Carrio propõem em (Carrio et al. 2017) uma técnica utilizando câmeras infravermelhas em conjunto com sensores ADS-B. Com essas câmeras, captam-se o calor emitido pelos objetos, e com isso é possível cobrir as falhas ocorridas nas câmeras RGB por falta de iluminação ou visibilidade. Seus testes demonstraram bons resultados em dias nublados, porém tiveram um grande número de falhas em períodos noturnos, pois as aeronaves não retinham muito o calor, atrapalhando a detecção pelas câmeras termais.

Fasano (Fasano et al. 2008) descrevem e testam um sistema de fusão de sensores, utilizando nele um radar *Ka-band* em conjunto com câmeras visuais RGB e câmeras infravermelhas, na tentativa de detectar um conflito e desviar um VANT de uma possível colisão com uma outra aeronave.

Rasamasy e Sabatini (Ramasamy, Sabatini, and Gardi 2016) descrevem um conjunto de sensores de detecção promissores para uso em VANTs, avaliando as vantagens e desvantagens de sua utilização. Entre os sensores estudados, estão o LIDAR, o MMW Radar, os sensores acústicos, as câmeras termais e óticas, além dos sensores colaborativos. É demonstrada uma modelagem de função de sensores para detecção, no qual sensores colaborativos recebem prioridade na detecção, e as detecção secundárias são feitas por meio de sensores não colaborativos, dentre eles sensores acústicos, radares, e câmeras visuais e termais, que por sua vez são complementares uma a outra.

3. DETECÃO DE OBJETOS EM VISÃO COMPUTACIONAL

Com o avanço de técnicas de visão computacional aliadas a algoritmos de *machine learning*, e devido ao baixo custo, peso e tamanho das câmeras, o número de trabalho

utilizando este sensor para detecção de objetos por VANTs vem aumentado significativamente.

A detecção de objetos através de visão passa por duas etapas: a primeira, de localização do objeto alvo na imagem (seja ela 2D ou 3D), e a segunda, referente ao cálculo da posição deste objeto no ambiente, de modo a comparar sua posição com à do VANT. Para as duas etapas podem ser utilizados diversos algoritmos distintos.

3.1. Detecção objetos em imagem

Para a detecção de um objeto na imagem, para o algoritmo é necessário extrair o máximo de informações presentes nela, com o objetivo de se reconhecer padrões que diferenciam o objeto alvo dos demais elementos presentes na imagem. A extração de características da imagem pode ocorrer de diversas maneiras, através de informações de textura, como a utilizado no algoritmo LBP (Guo, Zhang, and Zhang 2010) por meio de cálculos do gradiente da imagem, como no algoritmo HOG ou SIFT, ou no relacionamento entre os *pixels*, como o presente nos algoritmos de redes neurais convolucionais (CNN) (Yang et al. 2011).

Após a extração das características da imagem, os algoritmos a classificam como contendo ou não o objeto alvo. Uma abordagem muito utilizada com este objetivo está presente nos algoritmos de aprendizado de máquina, como: o SVM (Russell and Norvig 2010), que calcula um hiperplano capaz de classificar os dados em classes; o *Naive Bayes*, que se utiliza de cálculos probabilístico, baseados na aplicação do algoritmo no teorema de *Bayes*; as Árvores de Decisão, que aplicam métricas matemáticas, como Entropia, para calcular as características que melhor separam as classes dos dados (Russell and Norvig 2010); o *LigthGBM* (Ke et al. 2017), que utilizam várias árvores de decisão encadeadas, para se tornar mais robusta a classificação; ou as técnicas de *deep leaning*, exemplificada pelos algoritmos Xception (Chollet 2017) e YOLO (Redmon and Farhadi 2018), que utilizam CNN para a detecção.

Estes algoritmos, após treinados, são capazes de identificar se em uma imagem está presente ou não um determinado objeto. Para se reconhecer o local exato da imagem onde ele está presente, é possível dividir a imagem em várias partes menores a serem analisadas, utilizando técnicas de janelas deslizantes. Ambos os algoritmos podem ser utilizados tanto em imagem de câmeras visuais como em imagem de câmeras de profundidade.

3.2. Cálculo da posição do objeto através da imagem

Para ser possível calcular essa distância é necessário que as imagens utilizadas sejam capazes de reconstruir o ambiente capturado em 3 dimensões. Estes dados podem ser alcançados de duas maneiras: por meio de um sensor que capte dados de profundidade, ou utilizando um conjunto de dois ou mais sensores que capturem imagem em apenas duas dimensões, que é uma técnica conhecida como visão binocular, também chamada de visão estéreo.

3.2.1. Câmeras de profundidade

Câmeras de profundidade são sensores capazes de capturar imagens em 3D. Eles podem utilizar diferentes técnicas como *lasers* ou feixes de luz. Acrescentar este tipo de sensor torna este tipo de abordagem mais cara do que as que se utilizam de câmeras tradicionais.

Seus dados frequentemente são retornados como uma matriz, similar à obtida pelas câmeras visuais, o que permite que os mesmos algoritmos possam ser utilizados neste sensor, desde de que ambos tenham etapas de treinamentos individuais, para melhor performance do algoritmo.

3.2.2. Visão binocular

A visão binocular, ocorre quando uma imagem for capturada por dois ou mais sensores, permitindo, assim, o cálculo da profundidade da imagem. Com esta técnica é possível calcular um mapa de profundidade, similar à imagem retornada pela câmera de profundidade, a partir de duas câmeras visuais simples.

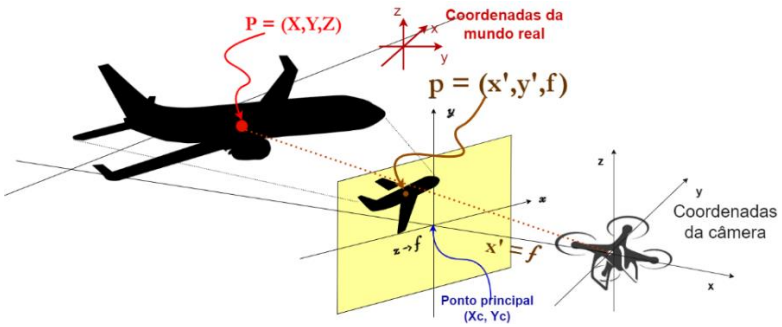


Figure 1: Formulação da imagem pelo modelo de câmera *pinhole*.

Para este cálculo, esta técnica utiliza princípios geométricos aplicados ao modelo de formação da imagem. Um dos modelos matemáticos que melhor descreve essa projeção é o modelo da câmera *pinhole*, no qual a câmera é comparada com um objeto, que permite que a luz passe apenas por um pequeno orifício, formando uma projeção do ambiente em uma imagem virtual, situada a uma distância igual a sua distância focal. (Forsyth and Ponce 2011). Neste modelo pode-se aplicar fórmulas geométricas e demonstrar, matematicamente, a formação da imagem.

Na Figura 1 apresenta-se a geometria de uma projeção de câmera, na qual o drone representa a câmera que está no centro (0, 0, 0) do seu próprio eixo de coordenadas (*x*, *y*, *z*), o objeto analisado (uma aeronave) está posicionado no ponto *P* = (*X*, *Y*, *Z*) no eixo de coordenadas do mundo real (representado em vermelho), e a imagem virtual projetada está representada na cor amarela, tendo o ponto principal (*Xc*, *Yc*) em seu o centro, e a distância *x* em relação ao *drone*, igual a distância focal da câmera *f*.

Porém, este modelo permite apenas o calcular a posição do objeto analisado em duas dimensões, pois ao se calcular a sua profundidade, chega-se a uma equação de reta. Para encontrar o valor exato da profundidade é necessário acrescentar uma segunda câmera, traçando duas equações de reta, e calculando-se o encontro delas. Este cálculo é chamado de geometria epipolar, e seu princípio está ilustrado na Figure 2.

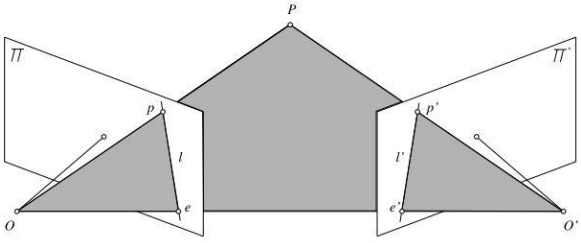


Figure 2: Geometria epipolar, em que P é a posição real do objeto, p' e p as projeções da imagem referentes às duas câmeras, e O e O' as câmeras da esquerda e da direita.

4. SIMULAÇÃO

Objetivando avaliar a eficácia, eficiência dos modelos de detecção de objetos, tornou-se necessária a realização de testes, utilizando os diferentes algoritmos descritos. Porém, para que esses testes ocorram de modo seguro, sem haver colisão entre aeronaves, eles devem ser realizados em simuladores, antes de serem implementados em VANTs reais.

4.1. Avaliação de simuladores

Visando uma simulação "a mais fidedigna possível" da realidade é necessária a escolha do simulador. Foram analisadas sete métricas essenciais que apresentam as melhores características para testes de *sense and avoid* com múltiplos sensores. São elas:

Física realista: Para que se consiga uma simulação realista de cálculos físicos do modelo da dinâmica e cinemática.

Modelagem de VANTs: Para a realização de testes que envolvam a possível colisão de aeronaves, além da dinâmica envolvida nas aeronaves e objetos é necessária uma representação física do corpo do veículo, que pode variar desde um pequeno VANT até a grandes aeronaves autônomas.

Simulação de sensores: Para testar os algoritmos é necessário que seja possível simular diferentes tipos de sensores para detecção, entre eles as câmeras visuais e de profundidade e o um sensor colaborativo, além da simulação de sensores inerciais.

Simulação do ambiente: Colisões de um VANT podem ocorrer não apenas com outras aeronaves, mas também com construções ou montanhas. Além disso, o ambiente pode ser um fator de grande impacto na qualidade de detecção.

Visualização gráfica realistas: As Câmeras têm seus algoritmos são ligados a visualização do ambiente em sua volta, sendo necessárias visualizações gráficas que simulem o cenário e o ambiente da forma mais real possível.

Código aberto: Para que o simulador possa ser utilizando por um maior número de pessoas é importante que exista a possibilidade de edição e utilização do seu código. Estas são as características desejáveis de *softwares* de código aberto (*OpenSource*).

Simulação de comunicação: Para que os testes se tornem mais realistas é necessário também simular a comunicação envolvida. Neste caso, deve-se enviar e ler dados do simulador de forma similar à encontrada em VANTs reais. Nesses veículos, essa comunicação normalmente se dá por meio de um protocolo TCP/IP, denominado de MavLink.

4.2. Estado da arte em simulação empregadas em VANTs

Dentre os simuladores pesquisados, o Gazebo (Koenig and Howard 2004) está entre o mais popular no meio robótico. Este simulador, um dos pioneiros na criação de ambientes realistas em 3D para interações com robôs, foi desenvolvido com uma representação fiel da dinâmica e da cinemática relacionadas com um robô, contando com um projeto modular que permite a criação de diversos sensores e mecanismos, como braços robóticos. Por ser um simulador de código aberto, tem grande utilização, sendo alvo de criação de vários *plug-ins* e funcionalidades incrementais. Trabalhos recentes modelaram a física e o corpo de VANT no Gazebo (Sendobry et al. 2012), permitindo simulações deste tipo de veículo. Porém, por ser um simulador antigo, o Gazebo conta com uma modelagem gráfica de certa forma ultrapassada, o que pode prejudicar testes que envolvam visão computacional.

Pesquisas mais recentes têm apresentado simuladores que se utilizam de tecnologias que apresentam gráficos modernos e realistas, como a *Unreal*, uma *engine* de *games* desenvolvida pela *Epic Games*. Ela é utilizada em diversos trabalhos de simulação e, dentre esses trabalhos, destaca-se (Savva et al. 2017) no qual é descrito o MINOS (*Multimodal Indoor Simulator for Navigation in Complex Environments*), um simulador criado para testes de navegação e inteligência artificial em robôs, utilizando técnicas multissensoriais. Porém, sem ter o foco específico em VANTs, esses veículos não estão modelados neste sensor.

O UE4Sim, desenvolvido por Mueller et al. (Müller 2017) é um outro trabalho de simulação utilizando a *Unreal Engine*. Para este simulador, os autores modelaram o corpo e a física de VANTs quadrimotores e carros, com o intuito de testar algoritmos de detecção e rastreamento por intermédio de visão computacional. Porém, este simulador conta com um número limitado de sensores, não apresentando sensores colaborativos ou inerciais.

Por fim, tem-se o AirSim – *Aerial Informatics and Robotics Simulation* (Shah et al. 2017), desenvolvido pela Microsoft para teste de inteligência artificial e navegação em VANTs e em carros autônomos. Ele tem a sua essência criada com base no *Unreal Engine*, contém a modelagem de um VANT com uma ótima simulação física de dinâmica e cinemática para quadrimotores, e tem como vantagens uma API para controle de VANT por meio do protocolo MavLink (*Micro Air Vehicle Link*), similar à utilizada em VANTs reais. Permitindo que se utilize os mesmos comandos empregados em aeronaves reais, ele contém diversos tipos de sensores simulados, como câmeras visuais e de profundidade, além de sensores inerciais (acelerômetro, giroscópio, barômetro, magnetômetro e GPS).

Assim, o AirSim é o único simulador que apresenta todas as métricas analisadas, sendo,

desta forma, o escolhido para as simulações realizadas neste trabalho.

5. ARQUITETURA PROPOSTA PARA O SENSORIAMENTO

Para criação de sistema que permita múltiplos sensores trabalharem em conjunto na detecção de um objeto em risco de colisão, foi necessária a criação de uma arquitetura eficiente com múltiplos algoritmos, processando dados vindo de diferentes fontes.

Visando propor uma solução elegante para este problema, a construção do sistema se baseou em módulos seguindo os conceitos de coesão e acoplamento da engenharia de software. Coesão, segundo o princípio de responsabilidade única (E Gamma, R Helm, R Johnson 1994), refere-se à ideia de que cada módulos teve cumprir com apenas uma determinada função, enquanto o acoplamento refere-se ao relacionamento entre os módulos, tendo sempre em vista sistemas nos quais os módulos têm baixo relacionamento, comunicando-se com os demais por meio de uma interface específica.

5.1. *Observer* invertido

Porém a comunicação dos sensores com o algoritmo de detecção é um processo de fusão de algoritmos e um processo complexo, pois um dos seus requisitos é permitir uma quantidade variada de sensores. Para que a arquitetura proposta seja robusta a essa personalização, preferencialmente permitindo a troca de sensores também em tempo de execução, é necessário a criação de um *design* específico.

Na engenharia de *software* existem dois padrões de *design* clássicos que resolvem em parte este requisito, o *Strategy* e o *Observer*, porém nenhum deles resolve este requisito totalmente.

O *Strategy* (E Gamma, R Helm, R Johnson 1994) tem como principal foco encapsular um algoritmo, permitindo que o sistema defina uma família de algoritmos similares que possam ser alterados em tempo de execução, algo similar ao que ocorre no *framework* proposto neste trabalho. Porém, este padrão não permite que vários algoritmos trabalhem de forma independente ao mesmo tempo e com o mesmo conjunto de dados, nem cria uma maneira de comunicação com uma classe gerenciadora.

Por outro lado, o *Observer* (E Gamma, R Helm, R Johnson 1994) é um padrão que define uma dependência de "um para muitos" entre objetos. Nele, uma classe principal, chamada de *subject*, pode conter um número variado de objetos dependentes, chamados de *observer*. Este padrão visa facilitar a atualização do estado dos *observer*, caso ocorra uma mudança na classe *subject*. Porém, no sistema proposto, o caminho é o inverso, ou seja, existe uma dependência de "muitos para um", pois nele há somente um objeto da classe fusão de sensores, que é dependente de dados vindo de diversos objetos da classe de algoritmos de detecção.

Para resolver estes impasses neste trabalho é proposta a criação de um padrão alternativo, que unifica o *Observer* e a *Strategy*, funcionando com um padrão de dependência de "muitos para um", no qual pode-se alterar o algoritmo em tempo de execução. Nele a classe observadora é a Detecção, e esta, por sua vez, contém uma lista de classes fornecedoras de dados, que são os objetos da classe algoritmo de detecção. Os algoritmos, ao encontrarem um novo objeto em risco de colisão, enviam um sinal à classe fusão de sensores com os dados do objeto observado. Para permitir o envio deste sinal é utilizado o conceito de delegação, fazendo com que a classe de detecção tenha uma referência do objeto da classe fusão de sensores. Assim, permite-se ao sensoriamento executar a ação de atualizar o objeto de detecção, ou seja, a classe observadora delega a ação de atualização às classes fornecedoras.

A Figura 3 existe um exemplo da relação entre as classes *Fusão de sensores* e *algoritmo de detecção*, exibindo a organização do padrão proposto segundo a linguagem UML. Nela as classes descritas como interface contém apenas o padrão de comunicação, e as classes concretas herdam estes padrões, além de implementação da técnica utilizada.

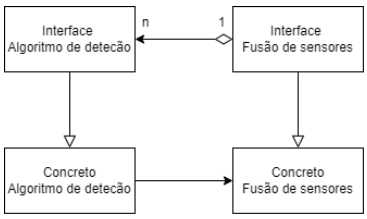


Figure 3: Diagrama de classes *Observe* Invertido.

Para exemplificar esse modelo, pode-se escolher um caso no qual a detecção ocorre por meio de dois sensores, uma câmera visual, utilizando o algoritmo SVM, e uma câmera de profundidade, utilizando o algoritmo de árvores de decisão. Para a fusão dos sensores é utilizada uma média simples da posição detectada em cada algoritmo. Segundo este padrão, a classe dos dois algoritmos de detecção teria que herdar a comunicação da classe *Interface de Algoritmos de Detecção*, e assim a comunicação de ambos os algoritmos utiliza o mesmo padrão. Enquanto isso, a classe de fusão por média simples irá herdar a comunicação da classe *Interface de fusão de sensores*, comunicando-se com as demais com uma modelo da interface. Devido a todas as classes utilizarem um modelo pré-definido de comunicação, alterações pontuais em cada uma delas podem ocorrer sem a necessidade de mudanças nas demais, permitindo, por exemplo, a troca do algoritmo de detecção por câmera visual, sem exigir alterações no módulo de fusões de sensores. A Figure 4 ilustra o exemplo dado

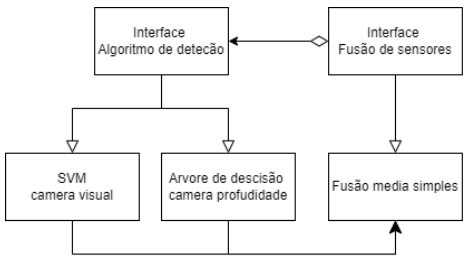


Figure 4: Exemplo de utilização do *Observer* Invertido.

6. TESTES

6.1. Cenário de teste

Os testes foram conduzidos criando-se uma simulação em um ambiente 3D no qual existem sempre apenas dois objetos: o veículo controlado, no caso um VANT quadrimotor, e o veículo em rota de colisão, um avião modelo Boeing 737.

Os cenários foram modelados de modo que ambas as aeronaves tenham uma rota retilínea e em todas as execuções gerem uma colisão frontal entre o VANT e o avião.

Para se calcular uma rota de colisão foi criada uma função que recebe quatro parâmetros: o ponto de colisão, o ângulo θ entre suas rotas, o tempo para colisão (t) e velocidade (v) da aeronave.

No total, foram gerados 9 cenários de testes distintos, nos quais se altera o ângulo θ de incidência entre a rota do VANT e a da aeronave, variando entre 40º e -40º, de 10º em 10º. A Figure 5 ilustra esse modelo.

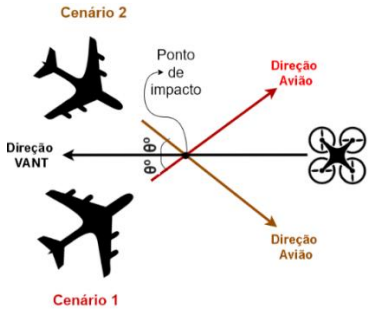


Figure 5: Ilustração de um cenário de colisão.

6.2. Algoritmos analisado

Nos testes foram analisados 3 sensores de detecção diferentes, câmeras visuais, câmeras de profundidade e o ADS-B, todos simulados através do AirSim.

Para detecção por meio do ADS-B, foram utilizados apenas cálculos geométricos, que permitem calcular a distância entre as aeronaves considerando os dados recebidos pelo sensor. Na detecção do objeto na imagem foram utilizados os mesmos algoritmos para os dados das câmeras visuais e de profundidade, porém com treinamentos diferentes. São eles: SVM, *Random Forest*, *Ligthgbm*, *Percetron* multicamadas, *Naive Bayes* e *Deep Learning* (com base no *Xception*). Porém, nos algoritmos utilizando câmeras visuais, foi utilizando a visão binocular para ser possível calcular a posição do objeto.

Após os testes das detecções individuais, os algoritmos com melhores resultados de precisão e cobertura foram testados em fusão,

e a partir disso foram criados 8 cenários diferentes de simulação, São eles:

1. Visão binocular (maior cobertura) + Câmera de profundidade (maior cobertura);
2. Visão binocular (maior precisão) + Câmera de profundidade (maior cobertura);
3. Visão binocular (maior cobertura) + Câmera de profundidade (maior precisão);
4. Visão binocular (maior precisão) + Câmera de profundidade (maior precisão);
5. Visão binocular (maior cobertura) + ADS-B;
6. Câmera de profundidade (maior cobertura) + ADS-B;
7. Visão binocular (maior cobertura) + Câmera de profundidade (maior cobertura) + Misto Câmeras + ADS-B;
8. Visão binocular (maior precisão) + Câmera de profundidade (maior precisão) + Misto Câmeras + ADS-B.

Os algoritmos de detecção utilizando apenas um sensor, e os utilizando fusão de sensores, foram todos analisados por meio das mesmas métricas.

A fusão de sensores ocorreu utilizando dois algoritmos diferentes, a média simples e a média ponderada pela precisão encontrada nos algoritmos no primeiro teste.

6.3. Métricas de análises

A avaliação foi baseada no erro entre a posição detectada da aeronave e sua posição real. A cada detecção foi calculada a distância euclidiana, em metros, entre essas duas posições (a posição detectada e a posição real). A partir dessa distância foi verificado se o objeto foi encontrado corretamente, ou não. Foi considerada uma detecção correta aquela em que a distância entre a posição real e a detectada é menor do que 100 metros, enquanto que para distâncias maiores do que 100 metros foram consideras detecções erradas. A partir deste cálculo, foram obtidos quatro métricas de avaliação para cada algoritmo, que são:

• **Média do erro:** Também denotada por μ, a média do erro é calculada por meio da média da distância entre a posição da aeronave detectada e a posição real da aeronave, em todos os *frames*. Porém, no cálculo só se leva em consideração detecções consideradas corretas, ou seja, detecções nas quais essa distância é menor do que 100 metros. Dessa forma, a média do erro indica a precisão do algoritmo.

• **Taxa de verdadeiro positivo:** Representam a taxa de detecções consideradas corretas considerando todas as detecções feitas pelo algoritmo, ou seja, a porcentagem de detecções no qual o erro é menor que 100 metros. Taxas altas de verdadeiros positivos significam que o algoritmo tem grande cobertura de detecção correta na maioria dos *frames*. Essa taxa é representada em termos de porcentagem.

• **Taxa de falso positivo**: Representam a porcentagem de detecções consideradas inválidas, ou seja, aquelas que apresentam distância maior do que 100 metros entre as posições real e detectada da aeronave. Taxas de falso positivo altas sinalizam que o algoritmo tem a tendência de detectar aeronaves em locais onde elas não estão. Nestes casos, houve uma detecção, porém, essas detecções estão erradas.

• **Taxa de falso negativo:** Assim como os falsos positivos, a taxa de falsos negativos também calcula uma porcentagem de erro, porém neste caso o erro se dá por não haver uma detecção onde existe uma aeronave. Dessa forma, essa taxa calcula a porcentagem de frames contendo aeronaves nos quais não foi identificada a aeronave pelo algoritmo. Algoritmos com altas taxas de falso negativo podem significar *overfit*, que ocorre quando o algoritmo está tão otimizado para um determinado conjunto de dados que não reconhece dados de mesma classe fora do conjunto de treinamento.

7. RESULTADOS

7.1. Detecções individuais

Os resultados das métricas analisadas para as detecções utilizando apenas um sensor de visão computacional estão apresentados na Tabela 1. Nela está destacado, em negrito, os valores dos resultados que apresentam maior

cobertura (%VP) e maior precisão (μ). O resultado obtido pelo uso do ADS-B está mostrado separadamente na Tabela 2.

7.2. Detecções por fusão de sensores

Para análises por fusão de sensores, foram criados 8 cenários diferentes, que variam conforme o número sensores testados e os algoritmos utilizados. Os cenários estão descritos no item 6.2.

Para os cenários foram utilizados os algoritmos de maior cobertura e com maior precisão, referentes a cada sensor. Na visão binocular, o mais preciso foi o algoritmo *Naive Bayes*, enquanto o mais com maior cobertura o *Deep Learning*, enquanto os dados de câmera de profundidade, o mais precisso o *Deep Learning*, a maior cobertura o *Random Forest*. A Tabela 3 apresenta esses resultados.

Tabela 1: Média de erro dos algoritmos de detecção entre os algoritmos de aprendizado supervisionado: os valores em negrito representam os melhores valores para um algoritmo segundo a métrica analisada

Algoritmos	***Visão Binocular***				***Câmera de Profundidade***			
Detecção	**μ*(m)***	***%VP***	***%FP***	***%FN***	**μ(*m*)**	***%VP***	***%FP***	***%FN***
SVM	*41,6*	*34%*	*64%*	*2%*	*42,5*	*93%*	*7%*	*0%*
Random Forest	*28,8*	***47%***	*53%*	*0%*	*34.3*	***100%***	*0%*	*0%*
LigthGBM	*32,6*	*31%*	*56%*	*13%*	*49,1*	*2%*	*98%*	*0%*
Naive Bayes	***28,2***	*20%*	*26%*	*54%*	*37,4*	*87%*	*13%*	*0%*
Rede Neural	*34,4*	*33%*	*64%*	*0%*	*43,2*	*97%*	*3%*	*0%*
Deep Learning	*39,23*	***50%***	*25%*	*25%*	***32,0***	*78%*	*0%*	*22%*

Tabela 2: Resultados de detecção de aeronave utilizando ADS-B

Algoritmo	**μ *(M)***	***%VP***	***%FP***	***%FN***
ADS-B	*0,69*	*99,6%*	*0%*	*0,4%*

Tabela 3: Resultados da detecção por fusão de sensores

Técnica de fusão	***Média simples***				***Média ponderada***			
COMBINAÇÃO	**μ*(m)***	***%VP***	***%FP***	***%FN***	**μ*(m)***	***%VP***	***%FP***	***%FN***
1	*34,9*	*100%*	*0%*	*0%*	*36,3*	*16%*	*82%*	*0%*
2	*23,6*	*100%*	*0%*	*0%*	*18,5*	*31%*	*70%*	*0%*
3	*51,3*	*44%*	*56%*	*0%*	*26,3*	*43%*	*57%*	*0%*
4	*48,9*	*80%*	*20%*	*0%*	*42,0*	*44%*	*56%*	*0%*
5	*30,5*	*50%*	*50%*	*0%*	*13,1*	*20%*	*80%*	*0%*
6	*18,3*	*98%*	*2%*	*0%*	*19,0*	*82%*	*18%*	*0%*
7	*18,8*	*100%*	*0%*	*0%*	*16,7*	*98%*	*2%*	*0%*
8	*16,4*	*99%*	*1%*	*0%*	*16,7*	*91%*	*9%*	*0%*

8. CONCLUSÕES

Com estes testes é possível descobrir o grau de confiança de cada de cada técnica de detecção, verificando qual pode ser a mais adequada para cada cenário, levando em conta eventuais restrições, como sensores disponíveis, capacidade de processamento ou limitações da aeronave. Nas câmeras foram alcançados resultados com taxas de precisão de 28 m em uma cobertura de 100% das imagens.

A arquitetura proposta também se mostrou eficiente para testes com diversos sensores, algo que pode ser implemento em veículos reais, assim protegendo o sistema de eventuais falhas, pois a arquitetura é capaz de funcionar com um número variável de sensores.

Para uma melhoria na análise do sistema pode-se, futuramente, testar novos sensores e

algoritmos, além de criar uma segunda etapa com técnicas de desvio do objeto em colisão, completando a etapa de *sense and avoid*.

9. REFERÊNCIAS

Cappello, Francesco, Subramanian Ramasamy, Roberto Sabatini, and Jing Liu. 2015. "Low-Cost Sensors Based Multi-Sensor Data Fusion Techniques for RPAS Navigation and Guidance." *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2015* 714–22.

Carrio, Adrian, Yucong Lin, Srikanth Saripalli, and Pascual Campoy. 2017. "Obstacle Detection System for Small UAVs Using ADS-B and Thermal Imaging." *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (May 2014).

Chollet, François. 2017. "Xception: Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 1251–58.

E Gamma, R Helm, R Johnson, J. Vlissides. 1994. *Design Patterns: Abstraction and Reuse of Object-Oriented Design*. Berlin: Springer.

Eurocontrol. 2017. "ACAS Guide Airborne Collision Avoidance." (December).

FAA - Federal Aviation Administration. 2011. "Introduction to TCAS II - Version 7.1." 1–50.

FAA - Federal Aviation Administration. 2021. "FAA Aerospace Forecast."

Fasano, Giancarmine, Domenico Accardo, Antonio Moccia, Ciro Carbone, Umberto Ciniglio, Federico Corraro, and Salvatore Luongo. 2008. "Multi-Sensor-Based Fully Autonomous Non-Cooperative Collision Avoidance System for Unmanned Air Vehicles." *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication* 5(10):338–60.

Forsyth, David and Jean Ponce. 2011. *Computer Vision: A Modern Approach*. Vol. 59.

Guo, Zhenhua, Lei Zhang, and David Zhang. 2010. "A Completed Modeling of Local Binary Pattern Operator for Texture Classification." 19(6):1657–63.

Ke, Guolin, Qi Meng, Thomas Finley, Taifeng Wang, Wei Chen, Weidong Ma, Qiwei Ye, and Tie-yan Liu. 2017. "LightGBM : A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree." (Nips):1–9.

Koenig, N. and A. Howard. 2004. "Design and Use Paradigms for Gazebo, an Open-Source Multi-Robot Simulator." *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)* 3:2149–54.

Kuchar, J. 2005. "Safety Analysis Methodology for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Collision Avoidance Systems." *6 Th USA / Europe Seminar on Air Traffic Management Research and Development, Baltimore, MD, June* 27:30.

Lacher, Andrew R., David R. Maroney, and a D. Zeitlin. 2007. "Unmanned Aircraft Collision Avoidance–Technology Assessment and Evaluation Methods." *7th Air Traffic Managemtent Research & Development Seminar* 1–10.

Müller, Thomas. 2017. "Robust Drone Detection for Day/Night Counter-UAV with Static VIS and SWIR Cameras." 10190(0):1019018.

Pestana, Jesús, José Luis Sanchez-Lopez, Pascual Campoy, and Srikanth Saripalli. 2013. "Vision Based GPS-Denied Object Tracking and Following for Unmanned Aerial Vehicles." *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR 2013*.

Ramasamy, Subramanian, Roberto Sabatini, and Alessandro Gardi. 2014. "Avionics Sensor Fusion for Small Size Unmanned Aircraft Sense-and-Avoid." *2014 IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace, MetroAeroSpace 2014 - Proceedings* (November):271–76.

Ramasamy, Subramanian, Roberto Sabatini, and Alessandro Gardi. 2016. "A Unified Approach to Separation Assurance and Collision Avoidance for Flight Management Systems." *AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings* 2016-Decem:1–8.

Redmon, Joseph and Ali Farhadi. 2018. "YOLOv3: An Incremental Improvement."

Ross, Stephane, Narek Melik-Barkhudarov, Kumar Shaurya Shankar, Andreas Wendel, Debadeepta Dey, J. Andrew Bagnell, and Martial Hebert. 2013. "Learning Monocular Reactive UAV Control in Cluttered Natural Environments." *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* 1765–72.

Russell, Stuart and Peter Norvig. 2010. *Artificial Intelligence A Modern Approach*. Pearson Education.

Savva, Manolis, Angel X. Chang, Alexey Dosovitskiy, Thomas Funkhouser, and Vladlen Koltun. 2017. "MINOS: Multimodal Indoor Simulator for Navigation in Complex Environments." 1–14.

Sendobry, Alexander, Heidelberger Printers, Stefan Kohlbrecher, Uwe Klingauf, and Oskar Von Stryk. 2012. "Comprehensive Simulation of Quadrotor UAVs Using ROS and Gazebo." 7628(November 2012).

Shah, Shital, Debadeepta Dey, Chris Lovett, and Ashish Kapoor. 2017. "Aerial Informatics and Robotics Platform." 1–17.

Wu, Yuanwei, Yao Sui, and Guanghui Wang. 2017. "Vision-Based Real-Time Aerial Object Localization and Tracking for UAV Sensing System." 1–9.

Yang, Hanxuan, Ling Shao, Feng Zheng, Liang Wang, Zhan Song, and Chain Monte. 2011. "Recent Advances and Trends in Visual Tracking : A Review." *Neurocomputing* 74(18):3823–31.

Yu, Xiang and Youmin Zhang. 2015. "Sense and Avoid Technologies with Applications to Unmanned Aircraft Systems: Review and Prospects." *Progress in Aerospace Sciences* 74:152–66.

MACHINE LEARNING APPLIED IN THE EVALUATION OF AIRPORT PROJECTS

Ítalo Guedes[1], Max Andrade[1], Cleber Zanchettin[2]
[1]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), [2]Centro de Informática Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

*** Corresponding author e-mail address**: italo.guedes@ufpe.br

PAPER ID: SIT214

RESUMO

O Brasil é um país com dimensões continentais, tendo o transporte aéreo como um vetor estratégico no desenvolvimento econômico. Em virtude de uma conjugação favorável de fatores, tais como: dimensão territorial, alta mobilidade geográfica e social, dentre outros, o Brasil tornou-se um dos países emergentes com elevado potencial de desenvolvimento do transporte aéreo. No que diz respeito ao desenvolvimento de um projeto aeroportuário no Brasil, uma série de pré-requisitos normativos norteiam os projetistas durante o desenvolvimento. Dentre os documentos, pode-se destacar: i) RBAC (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil), ii) Manual de Projetos Aeroportuários, iii) Anexo 14, iv) Manual de Critérios e Condições de Planejamento Aeroportuário, entre outros. Tendo em vista a quantidade elevada de documentos normativos a serem considerados na fase de desenvolvimento de um projeto aeroportuário, faz-se necessário que a equipe de analistas de projeto disponha de expertise para realizar a avaliação desses projetos. Na situação atual, o processo de avaliação e aprovação tende a perdurar meses e, em alguns casos, até anos, até a aprovação final do projeto. Este artigo apresenta resultados parciais de uma pesquisa de doutorado em desenvolvimento que utiliza técnicas de Aprendizagem de Máquina na fase de avaliação de projetos aeroportuários a partir de dados contidos nos modelos digitais de aeroportos baseado na Modelagem da Informação da Construção (BIM). Os resultados preliminares desta pesquisa demonstram a utilização de três algoritmos de aprendizagem supervisionada conseguindo obter uma acurácia de predição acima de 90%.

Palavras-chave: Airport, BIM, Evaluation, Machine Learning.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um projeto aeroportuário possui elevada complexidade, tendo em vista a série de exigências projetuais e normativas a serem atendidas na fase de desenvolvimento da documentação técnica do projeto. No Brasil, a avaliação e aprovação dos projetos aeroportuários desenvolvidos pelas equipes de projeto são realizadas pela Empresa Pública Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC), Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), dentre outros órgãos.

No que se refere ao desenvolvimento de um projeto aeroportuário, existe uma série de pré-requisitos normativos que norteiam seu desenvolvimento. Tendo em vista a quantidade elevada de documentos normativos a serem considerados na fase desenvolvimento dos projetos, faz-se necessário que as equipes de projetistas possuam expertise equivalente para conceber um projeto em atendimento a todas as normas vigentes. Da mesma forma, a equipe de analistas dos órgãos competentes pela avaliação e aprovação desses projetos precisa dispor da maturidade adequada para realizarem a avaliação.

O problema desta pesquisa está situado exatamente no ponto de interseção entre a fase de desenvolvimento do projeto (competência dos projetistas) e a fase de avaliação e aprovação do projeto (competência dos analistas dos órgãos responsáveis), conforme apresentado na Figura 1.

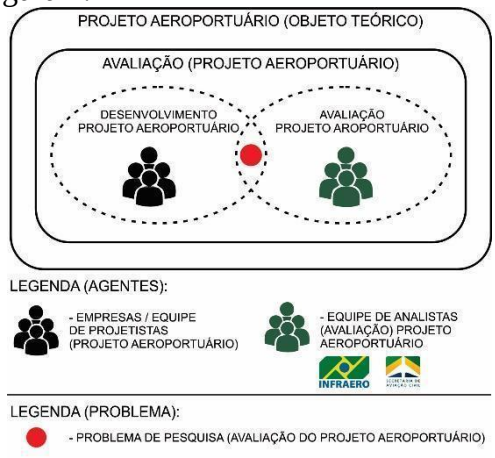


Figura 1 Problema da pesquisa abordado.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 1 apresenta o problema desta pesquisa. Está se dá no âmbito da interação entre os projetistas e as equipes de analistas que é feita por meio de Pareceres Técnicos (no caso da SAC) e Relatório de Acompanhamento Técnico (RAT) no caso da INFRAERO. Estes visam comunicar o resultado das avaliações dos projetos submetidos. Ou seja, informar se o projeto atende ou não aos pré-requisitos normativos baseados nas normas, manuais e demais documentos vigentes.

Diante do problema exposto, essa pesquisa tem como objetivo apresentar os resultados preliminares de um método que visa otimizar o processo de avaliação de projetos aeroportuários, utilizando-se, para isso, técnicas de Aprendizagem de Máquina (AM), subárea de pesquisa do campo da Inteligência Artificial (IA). Este artigo visou treinar algoritmos de AM supervisionada a partir de dados contidos em modelos digitais 3D de projetos aeroportuários baseado na Modelagem da Informação da Construção (BIM), tirando proveito de recursos computacionais do BIM combinado com técnicas de AM, objetivando auxiliar os analistas de projetos aeroportuários na tomada de decisão com base na predição automática dos dados na fase de avaliação dos projetos, visando reduzir o tempo de análise.

Neste artigo, foram utilizados três algoritmos baseado na abordagem do aprendizado de máquina supervisionado, sendo eles: *K-Nearest Neighbor* (k-NN), *Decision Tree* (DT) e *Support Vector Machines* (SVM) a escolha desses três algoritmos, deu-se em função da variação das características que cada algoritmo possui na construção da função hipótese visando classificar novos dados.

A primeira seção deste artigo abrange a fundamentação teórica sobre o tema, desde o Processo de Projeto e o Processo de Avaliação de Projetos até a interação dessas fases com Inteligência Artificial, Aprendizagem de Máquina e a Modelagem da Informação da Construção (BIM). A segunda seção apresenta a metodologia estabelecida para o desenvolvimento desta pesquisa baseado no *Design Science Research* (DSR). A terceira seção expõe o processo de construção do artefato visando aperfeiçoar o processo de avaliação de projetos aeroportuários. No DSR, a expressão artefato pode ser entendida como, o

cumprimento de um propósito, ou adaptação a um objetivo. A quarta e última seção, apresenta os resultados parciais alcançados, através da instanciação dos artefatos (03 modelos de AM supervisionado treinados) a partir dos dados contidos em projetos aeroportuários, avaliando o desempenho de cada modelo, assim como, expondo as possíveis aplicações desta abordagem para trabalhos futuros junto às considerações finais.

2. PROCESSO DE PROJETO E AVALIAÇÃO

Desde a década de 1950 surgiram investigações relacionadas a metodologia de projeto quando arquitetos e engenheiros, atentos ao cenário científico, passaram a aplicar novas técnicas no desenvolvimento de projeto para melhoria na qualidade do processo e dos seus produtos (SOBRAL et al, 2017).

Kalay (2004) expõe que o processo de projeto compreende três atividades principais que são realizadas de maneira interativa: analisar, sintetizar e prever/avaliar.

A primeira refere-se ao processo de analisar o problema e desenvolver um conjunto de objetivos que a solução proposta deve alcançar, juntamente com a lista de restrições pelas quais a solução deve obedecer (etapa concebida pelos projetistas). A segunda destina-se ao processo de sintetizar uma ou mais soluções que, com base na perspectiva do projetista, irá atingir os objetivos e respeitar as restrições projetuais (etapa realizada pelos projetistas). A terceira etapa representa o processo de prever e avaliar os vários desempenhos das soluções propostas visando verificar se são consistentes entre si e se, quando concretizadas, atingirão os objetivos estabelecidos (etapa realizada pela equipe de analistas de projeto aeroportuário).

Segundo Kalay (2004), a etapa destinada à avaliação é uma consequência direta e derivada da incerteza inerente ao processo de projeto. Como não existem fórmulas ou procedimentos que possam ser seguidos pelos projetistas que garantam que uma determinada solução de projeto atenderá aos objetivos e expectativas do projeto, este processo é necessariamente um processo de tentativa e erro. Neste as soluções são sintetizadas e seus desempenhos esperados são previstos e julgados comparando-os com os objetivos e restrições do projeto (KALAY, 2004).

O processo de avaliação pode ser compreendido como uma atividade que realiza previsões e comparações visando determinar se as soluções atendem e cumprem os objetivos, ou não atendem. No caso da segunda condição, fornecendo informações sobre o que pode ser feito para melhorar o ajuste, implicando na modificação das soluções. Se os projetistas o fizerem, a busca por uma solução estará encerrada. Caso contrário, o ciclo de avaliação poderá ser repetido até que a solução seja atendida.

No Brasil, no tocante aos projetos aeroportuários avaliados pela equipe de analistas da SAC, a média de revisões de projeto até o atendimento completo das solicitações realizadas pela equipe de analistas é de aproximadamente cinco revisões. Em alguns casos, esse tempo tende a durar entre meses ou anos até o projeto ser completamente aprovado.

3. PROJETOS AEROPORTUÁRIOS

O desenvolvimento de um projeto aeroportuário (PA) por natureza possui uma elevada complexidade, a natureza dos requisitos a serem contemplados podem ser tanto de questões estéticas quanto funcionais (SILVESTRI, 2016).

O primeiro tipo refere-se ao conjunto e escopos mais significativos do empreendimento, bem como, seus parâmetros incluindo elementos físicos, financeiros e cronograma. Já o segundo tipo, trata-se de elementos relacionados aos requisitos operacionais e funcionais dos clientes e agentes para o conjunto da obra (SILVESTRI, 2015).

Uma vez que um projeto aeroportuário é desenvolvido por uma equipe de projetistas, este é submetido para avaliação junto aos órgãos competentes. A emissão inicial (R00) conta com um conjunto de documentos, tais como: pranchas de projeto, memoriais descritivos, memórias de cálculos, dentre outros. Mediante o envio de toda a documentação técnica, inicia-se o processo de avaliação por parte da equipe de analistas de PA.

No cenário atual, os analistas precisam analisar todos os documentos submetidos pela

equipe de projetistas individualmente, de maneira analógica, visando identificar tanto conformidades quanto não conformidades contidas no projeto. Além disso, o processo de avaliação tende a ser subjetivo, devido às diferentes perspectivas e expertises de conhecimento dos analistas, no momento da análise (GUEDES E ANDRADE, 2020).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de projetos aeroportuários no Brasil baseado no uso do BIM foi alavancado devido à publicação do decreto de lei federal (Decreto nº10.306 de 2020). Este estabeleceu o uso do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal. Este decreto faz parte da Estratégia Nacional de Disseminação do BIM (Decreto Lei Federal nº9.983 - 2019) e evidencia o interesse do governo federal no uso do BIM em território nacional. O Decreto destaca o uso do BIM no Ministério da Infraestrutura, especificamente no âmbito da Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC), para projetos de aeroportos regionais.

4. MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO (BIM)

Segundo Sacks *et al.* (2018), o *Building Information Modeling* (BIM), é "...uma tecnologia de modelagem e conjunto associado de processos para produzir, comunicar, analisar modelos de construção...".

Segundo Succar (2009), o BIM refere-se a um conjunto de políticas, processos e tecnologias que interagem, gerando uma metodologia para gerenciar os dados essenciais do projeto de construção e do projeto em formato digital ao longo do ciclo de vida do empreendimento.

Com as tecnologias que suportam o BIM, especificamente a interoperabilidade e modelagem paramétrica, é possível verificar se o modelo de construção (protótipo virtual do edifício) possui objetos corretos, convenções, proporções, dados associados ao modelo digital e outras estruturas necessárias para avaliação.

Dessa maneira, os dados contidos em projeto em BIM podem ser utilizados na etapa de avaliação, permitindo subsidiar os analistas de projeto aeroportuário. Para esta pesquisa a utilização do BIM está associada na etapa avaliação dos dados utilizando técnicas de Aprendizagem de Máquina (AM) a serem discutidas nas seções seguintes.

5. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

Desde a década de 1970, o campo de conhecimento da Inteligência Artificial (IA) começou a ser explorado de forma mais ampla para solucionar problemas reais (RUSSEL E NORVIG, 2010). Com base no grande volume de dados gerados, e a elevada complexidade dos problemas a serem resolvidos, fez-se necessário a utilização de abordagens mais sofisticadas. Induzir hipóteses a partir de um conjunto de dados, que é a experiência passada de algum problema, é o objetivo do Aprendizado de Máquina (FACELI, *et al.* 2011).

Machine Learning (ML), em português, Aprendizado de Máquina (AM) trata-se de uma subárea de pesquisa de IA. Segundo Mitchell (1997), o AM explora o uso de métodos computacionais a fim de adquirir novos conhecimentos, novas habilidades e novos meios de organizar o conhecimento existente. Esse mesmo autor afirma que o AM refere-se à capacidade de melhorar o desempenho na realização de alguma tarefa por meio da experiência. Segundo Montanõ (2016), os algoritmos de AM são organizados de acordo com o paradigma de aprendizado adotado para lidar com a tarefa.

As técnicas de AM podem ser compreendidas em linhas gerais através de três paradigmas: Aprendizado Supervisionado, Aprendizado Não-Supervisionado e Aprendizado por Reforço. Esta pesquisa faz uso do primeiro tipo, no qual, os dados contidos no modelo BIM do aeroporto (atributos de entrada rotulados) são utilizados como exemplos para treinamento dos algoritmos classificadores, possibilitando que os algoritmos realizem a predição de novos dados (novos projetos).

No AM, cada componente é descrito por um vetor de atributos de entrada (x), variável resposta (y) e uma função objetivo ($f = X \rightarrow Y$) que visa mapear a relação entre a variável resposta e o vetor de descrição do problema. Em linhas gerais, um sistema de AM possui: i) conjunto de treinamento composto de exemplos de treinamento $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \ldots (x_n, y_n)$, ii)

algoritmo de aprendizagem e iii) hipótese final através da função ($g = X \rightarrow Y$).

Para este artigo foi criado um conjunto de dados sintéticos (*dataset*) baseados nas dimensões reais dos Terminais de Passageiros (TPS) tipo M0, M1, M2 e M3 da INFRAERO / SAC denominado "Terminal Regional" destinados a atender a aviação regional no Brasil.

Desta maneira, foi concebido um *dataset* contendo uma variação de valores de 500 projetos (aptos e não aptos) com base em duas áreas do TPS: atendimento check-in e fila de embarque do check-in baseado nos requisitos quantitativos contidos no Memorial de Critérios e Condicionantes (MCC) - Arquitetura / TPS da INFRAERO (2008), assim como, visando beneficiar o cronograma previsto pela SAC (2021) referente à estrutura incremental das cinco entregas previstas para projetos aeroportuários que adotem a metodologia BIM.

6. METODOLOGIA

Este trabalho fez uso do *Design Science Research* (DSR), conhecido também como *Constructive Research*. A DSR trata-se de uma abordagem direcionada à solução de problemas, baseado em um processo rigoroso de: i) conceber artefatos visando solucionar problemas, ii) avaliar o que foi projetado e iii) comunicar os resultados alcançados. Neste artigo, estão sendo apresentados os resultados parciais das etapas i e ii.

A escolha para o uso dessa abordagem metodológica, deu-se em função de dois fatores, i) o problema de pesquisa corresponde a uma situação real referente ao processo de avaliação de projetos aeroportuários no Brasil, ii) o caráter da pesquisa se enquadra na categoria de inovação tecnológica, tendo em vista aplicar técnicas disruptivas como IA e AM para avaliação de projetos aeroportuários.

Em um primeiro momento foi criado um *dataset* contendo informações associadas aos modelos de TPS da INFRAERO / SAC. Os dados foram: Largura check-in (L1); Comprimento check-in (C1); Largura da fila de embarque (L2); comprimento da fila de embarque (C2) com o intuito de utilizar os dados para o treinamento e teste de três algoritmos de Aprendizagem de Máquina supervisionado.

A Figura 2 apresenta o fluxo estabelecido nesta pesquisa, desde a etapa 1 destinada a criação da base dados (baseada nos dados contidos nos modelos BIM dos TPS), a etapa 2 referente ao pré-processamento dos dados (extração das características e redução da dimensionalidade dos dados), divisão do conjunto de dados para treinamento (70% dos dados) e para a fase de teste (30% dos dados), a etapa 3 destinada ao treinamento dos algoritmos de aprendizagem supervisionada e a etapa 4 atribuída a avaliação dos algoritmos classificadores.

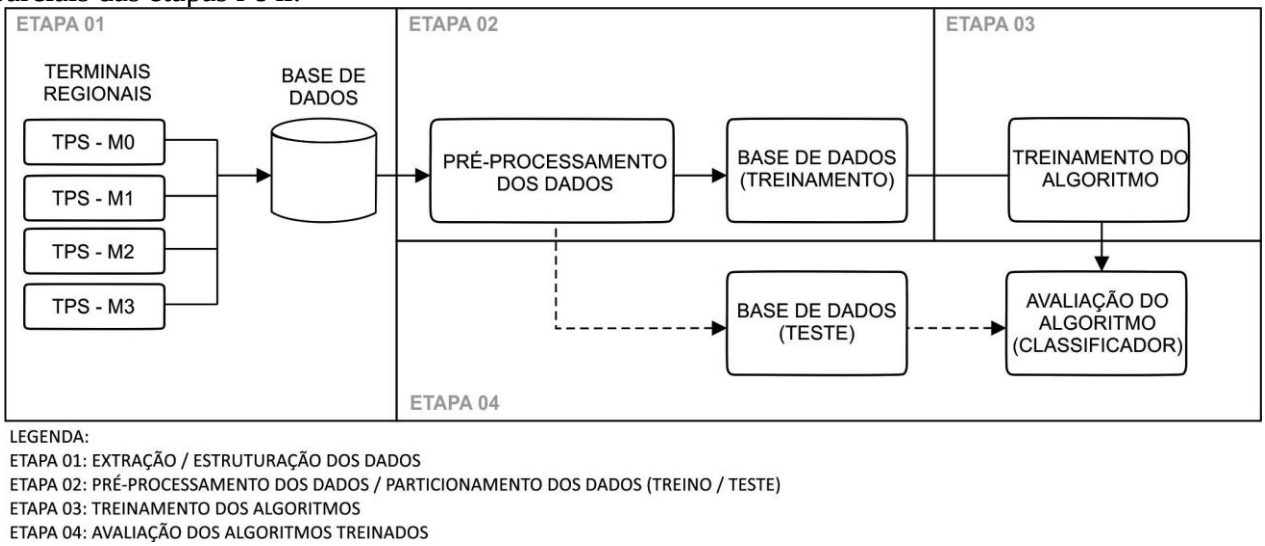


Figura 2 Fluxo das etapas desenvolvidas na metodologia proposta.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para este artigo, foram utilizados requisitos da área de check-in de um terminal de passageiros visando treinar os três algoritmos aprendizagem de máquina supervisionada. A Tabela 1 apresentada a seguir demonstra como os dados foram estruturados.

Tabela 1 - *Dataset* (recorte projeto 1 ao 5)

Projeto	*L1*	*C1*	*L2*	*C2*	*Status*
1	8,00	2,00	5,00	18,00	0
2	13,00	3,00	3,00	16,00	0
3	7,00	6,00	5,00	26,00	1
4	13,00	4,00	3,00	15,00	1
5	12,00	2,00	3,00	17,00	0

A coluna Projeto refere-se a descrição de dados de cada projeto, a coluna L1 (largura da área de atendimento do balcão de check-in) contém valores variáveis entre 2,00m (valor menor que o recomendado para um TPS tipo M0) e 16,00m (valor maior que o recomendável para um TPS tipo M3) com base no Manual de Critérios e Condicionantes de Planejamento Aeroportuário (INFRAERO, 2008).

A coluna C1 (comprimento da área de atendimento do check-in) contém valores entre 2,00m (valor menor que o recomendado para um TPS tipo M0) e 6,00m (valor maior que o recomendável para um TPS tipo M3).

A coluna L2 (largura da fila de embarque situada no check-in) contém valores entre 2,00m (valor menor que o recomendado para um TPS tipo M0) e 7,00m (valor maior que o recomendável para um TPS tipo M3).

A coluna C2 (comprimento de filas de embarques do check-in) contém valores entre 10,00m (valor menor que o recomendado para um TPS tipo M0) e 28,00m (valor maior que o recomendável para um TPS tipo M3).

Tendo em vista que o *dataset* foi criado com intuito de treinar algoritmos de aprendizagem supervisionada, onde a variável resposta é reconhecida como categórica, foi criado a coluna status destinada a apresentar o status para cada um dos 500 exemplos, tendo o valor 0 para os projetos "não aptos" e 1 para os projetos "aptos".

Vale salientar que os valores de referências utilizados nas colunas L1, C1, L2 e C2, foram considerados valores condizentes com as dimensões dos TPS Regionais construídos e analisados pela INFRAERO / SAC, já as referências de limite aceitáveis e não aceitáveis dos valores, foram extraídos do MCC - Arquitetura TPS (INFRAERO, 2008).

A Figura 3 apresenta o esquema de expansibilidade adotado para os terminais regionais, assim como, o modelo em BIM desenvolvido pelos autores baseado no tipo M3.

.

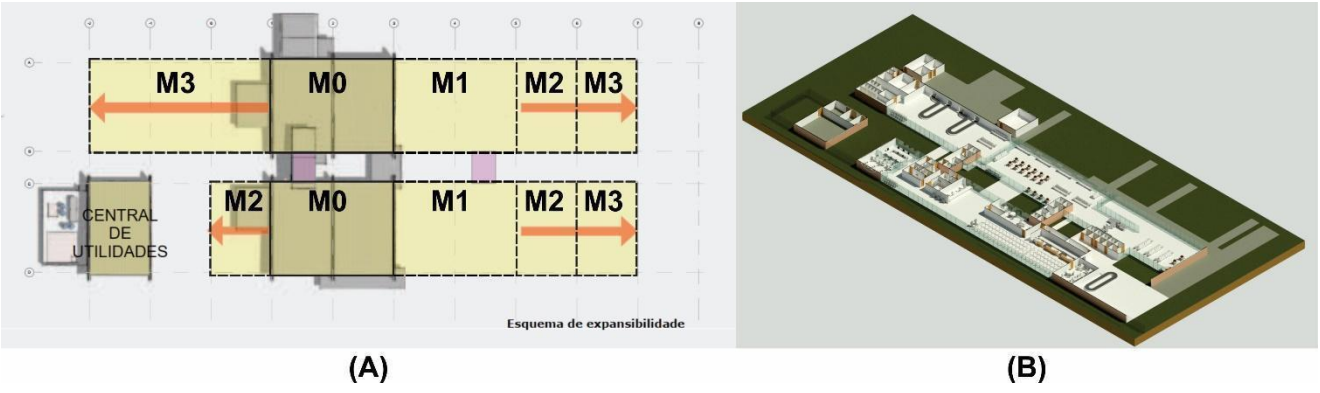


Figura 3 (A) esquema de expansão TPS Regionais (B) Modelo BIM TPS. Fonte: (A) INFRAERO / SAC (B) Elaborado pelos autores.

7. RESULTADOS

Mediante a criação do *dataset* contendo os 500 exemplos de projetos com seus respectivos valores associados, sendo possível realizar o treinamento dos três algoritmos de aprendizagem de máquina supervisionado *k-Nearest Neighbors* (k-NN), *Decision Tree* (DT) e *Support Vector Machine* (SVM).

Os três algoritmos foram implementados em linguagem *PYTHON* na

plataforma Google Collab executada em nuvem em um notebook com as seguintes configurações, processador Intel i7, CPU @2.20GHz e 8GB de RAM. Para a realização do treinamento de cada algoritmo, foram realizados ajustes específicos em seus respectivos hiperparâmetros.

No algoritmo k-NN foi estabelecido o valor de k-vizinhos mais próximo (k=3) tendo em vista que este ajuste possibilitou obter uma acurácia de 92,81%.

A Figura 4 apresenta os valores obtidos considerando a variação de k-vizinhos do algoritmo k-NN, tanto na fase de treinamento quanto na fase de validação.

Pela visualização da Figura 4, é possível perceber que o valor k=3 conseguiu alcançar uma melhor acurácia tanto na etapa de treinamento quanto na etapa de validação. Os demais hiperparâmetros deste algoritmo tais como: peso (*weigth*), tamanho da folha (*leaf_size*), métrica (*metric_params*), argumentos e trabalhos (*n-jobs*) foram utilizados os valores *default* da biblioteca Scikit-learn: Machine Learning in Python, Pedregosa *et al*. (2011).

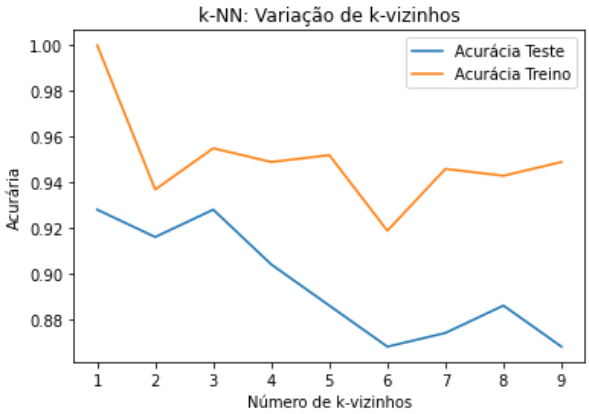


Figura 4 - Variação de k-vizinhos. Fonte: Elaborado pelos autores

Após o treinamento do algoritmo k-NN foi possível realizar o treinamento no algoritmo *Decision Tree* (DT), Árvore de Decisão em português.

Para o algoritmo DT, foi utilizado o mesmo *dataset*, assim como, foi possível realizar ajustes nos hiperparâmetros do algoritmo, a fim de que o mesmo pudesse alcançar uma melhor acurácia.

Desta maneira foi possível ajustar os hiperparâmetros de profundidade máxima da árvore (*max_depth*) = 3,00, limites de nós da árvore (*max_leaf_nodes*) = 4,00 visando obter um melhor desempenho. Os demais hiperparâmetros, foram considerados os valores *default* da biblioteca Scikit-learn. Desta maneira, o algoritmo DT conseguiu alcançar um percentual de acurácia de 99,40%.

Por fim, foi utilizado o mesmo *dataset* para treinar o algoritmo *Support Vector Machines* (SVM) Máquina de Vetor de Suporte, em português. Para este algoritmo, foi considerando todos os valores *default* da biblioteca Scikit-learn, sendo possível o algoritmo SVM conseguiu alcançar uma acurácia de 95,20%.

Uma vez treinados os três algoritmos, foi possível medir seus respectivos desempenho a partir de algumas métricas, sendo: acurácia, precisão, *recall* e F1-*score*. A escolha dessas métricas deu-se em função de poder avaliar os modelos treinados além de sua performance geral do ponto de vista da acurácia, mais também, poder analisar a variação dos percentuais obtidos com relação as classificações obtida com relação a precisão e *recall*, assim como, obter o F1-*score*. A Tabela 2 apresenta os resultados alcançados.

Tabela 2 – Desempenho dos algoritmos

Modelo	***Accuracy***	***Precision***	***Recall***	***F-1***
k-NN	0.93	0.89	0.96	0.92
DT	0.99	0.99	0.99	0.99
SVM	0.95	0.95	0.95	0.95

A acurácia foi definida como a razão entre a taxa de acertos em relação ao total de amostras. A equação (1) apresentada abaixo demonstra como foi calculado a acurácia.

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (1)$$

Legenda:
VP: verdadeiros positivos (classificação correta da classe positiva);
VN: verdadeiros negativos (classificação correta da classe negativa);

FP: falsos positivos (erro em que o modelo previu a classe positiva quando deveria ser classe negativa);
FN: falsos negativos (erro em que o modelo previu a classe negativa quando deveria ser classe positiva).

A precisão refere-se a quanto os dados classificados como positivos realmente são positivos, a equação (2) demonstra como foi calculado a precisão.

$$Precisão = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (2)$$

O *recall*, também conhecido como taxa de verdadeiros positivos, é utilizado com o objetivo de identificar todos os positivos, demonstrando o percentual de quanto os positivos foram identificados pelas previsões positivas. A equação (3) apresenta como foi calculado o *recall*.

$$Recall = \frac{VP}{VP + VN} \quad (3)$$

Por fim, a métrica F-1 *Score*, representa a média entre a precisão e o *recall*, a equação (4) apresentada abaixo demonstra como se obteve os resultados.

$$F1 = 2 * \frac{Precisão * Recall}{Precisão + Recall} \quad (4)$$

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou resultados preliminares de uma pesquisa de doutorado em desenvolvimento. Os resultados alcançados até o momento mostram o potencial que a utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina proporciona na etapa de avaliação dos projetos aeroportuários. Para este artigo, foi criado um *dataset* sintético baseado apenas em parâmetros quantitativos relativos a projeto aeroportuário. Os resultados alcançados pelos três algoritmos k-NN, DT e SVM demonstram a capacidade de classificação dos algoritmos de aprendizagem supervisionada, alcançando percentuais de acurácia acima de 90%.

O resultado alcançado de 99,40% com o algoritmo DT demonstra a sua capacidade de identificar as classes dos dados “não aptos” e “aptos” através de seu funcionamento baseado no ganho de informação utilizando o conceito de entropia relativo à classificação booleana.

A utilização de técnicas de aprendizagem de máquina no processo de avaliação de projetos aeroportuários abre um novo horizonte para que as equipes de analistas de projetos aeroportuários, possam extrair diversas informações contidas nos modelos BIM de projetos aeroportuários visando transpor os dados para um contexto de AM, possibilitando promover um enriquecimento semântico na etapa de avaliação dos projetos.

O potencial dos algoritmos de AM em identificar padrões contidos em grandes conjuntos de dados possibilita que os analistas de projeto aeroportuários possam tirar proveito, utilizando os dados provenientes de projetos aeroportuários, utilizando esses dados para treinar os algoritmos, criando modelos capazes de realizar predições através de um conjunto de novos dados.

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foi notado que existe uma série de documentos relacionados ao estabelecimento de critérios quantitativos (normas, manuais, portarias, dentre outros), assim como, uma série de documentos relacionados a critérios qualitativos, sendo este segundo grupo, relativos a parâmetros que extrapolam os requisitos de dimensionamento dos espaços projetados em um aeroporto, se tratando de questões relativas à percepção dos visitantes e funcionários de um aeroporto relacionado a níveis de serviço, nível de conforto, assim como, indicadores de qualidade, tais como: indicadores *Airports Council International* (ACI), *Airport Development Reference Manual* (ADRM) do IATA (1991), dentre outros.

Para desdobramentos futuros, os autores recomendam realizar o cruzamento de dados do grupo de requisitos quantitativos com os requisitos qualitativos, a fim de verificar se os algoritmos de aprendizagem de máquina conseguirão identificar padrões e

realizar predições combinando esses dois grupos, assim como, experimentar a utilização de diferentes arquiteturas e modelos que possuam a capacidade de se adaptar a diferentes classes de dados, tais como Redes Neurais Artificiais (RNA), Redes Multilayer Perceptron (MLP), Redes Neurais Recorrentes (LSTM, GRU, QRNN), bem como, algoritmos de Aprendizagem Profunda (*Deep Learning*).

REFERÊNCIAS

Decreto nº 9,983 (2019). De 22 de agosto de 2019. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/Decreto/D9983.htm> acesso em ago/22.

F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay (2011). *Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research*, v.12: p. 2825-2830.

Faceli, K.; lorena, A. C.; Gama, J.; Carvalho, A. C. P. L. F. de. (2011*). Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina*. Rio de Janeiro: LTC.

Guedes Í.; Andrade M. (2020). *Standardization of Airport Architectural Design Projects BIM-based for Code Checking*. p. 490-498. In: Congreso SIGraDi 2020. São Paulo: Blucher.

IATA (1991). *Airport Development Reference Manual*, International Air Transport Association, Genebra.

INFRAERO (2008). *Memorial de Critérios e Condicionantes - Arquitetura / TPS* código GE.01/201.75/00947/02.

Kalay, Y. (2004). *Architecture's new media.* The MIT Press, Cambridge.

Mitchell, T. M (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 1 edition.

R. Sacks, C. Eastman, G. Lee, and P. Teicholz (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. Hoboken, NJ, USA: Wiley.

SAC (2021). *Manual de Projetos Aeroportuários* [livro eletrônico]: volume único. 1. Ed. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Aviação Civil.

Silvestri, A. L. S. (2016). *Termo de referência para gestão de projetos arquitetônicos de terminais aeroportuários regionais de passageiros*. Tese de Doutorado, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Sobral, R.; azevedo, G.; Guimarães, M. (2017). *Design Methods Movement: as origens das pesquisas sobre métodos de projeto*. p. 27-42. In: Design & Complexidade; Complexidade. São Paulo: Blucher.

Succar, B. (2009). *Building Information Modelling Framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders.* Automation in Construction, v. 18, n. 3, p. 357-375.

A CONCEPTUAL MODEL TO THE USE OF INTELLIGENT COOPERATIVE TRUCK AND DRONE LOGISTIC OPERATION

Bruno Avelino de Araújo Oliveira, Mauro Caetano
Instituto Tecnológico da Aeronáutica – ITA

*** Corresponding author e-mail address**: avel.bruno@gmail.com, maurocaetano1912@gmail.com

PAPER ID: SIT193

ABSTRACT

Drones, also known as Unmanned Aerial Vehicle (UAV), has been considered the future of air transport for applications in the context of logistic operations. They can be used with trucks in an operation that leverage the advantages and disadvantages of each other, a problem known as Routing Problem with Drones (RP-D) in an operational research perspective. Recently, solution methods have been proposed to RP-D, but there is a valuable opportunity to develop a structured methodology in this field. This paper proposes a conceptual model from an analytical comparison of state-of-art metaheuristics, according to a sweep literature review. This conceptual model proposed consider the exact solution in small instances because can guarantee optimal solution and metaheuristic approach in not small instances, because can bring good solution in a reasonable time. This methodology is not meant to be complete but can be used to decide the best approach according to the size of the instance and can be enhanced by other recent methods as hybridization and artificial intelligence approaches.

Keywords: routing, drones, vehicle, methodology, metaheuristic.

1. INTRODUCTION

The term ‘drones’, a pilotless aircraft will be adopted to this study because many authors studied use this term but can be referred as Unmanned Aircraft Vehicle (UAV), unmanned aircraft system (UAS), remotely pilot vehicle (RPV), remoted pilot aircraft (RPA), and many others. It can be considered the future of air transportation for several applications in logistic industry and is predicted the potential market value for drone technology business service to reach several billions of dollars. Its advantages from a traditional vehicle can be described as the constant and high travelling speed, no need for physical road infrastructure, no exposure to traffic and congestion, and the directness of travel (Otto et al., 2018; Rojas Viloria et al., 2020; Moshref-Javadi et al., 2021). In this sense, Chung, Sah and Lee (2020) describe the complementary of truck and drone in speed, weight, capacity, range, and energy consumption in Figure 1.

Mode	Speed	Weight	Capacity	Range	Energy Consumption
Drone	High	Light	One	Short	Low
Truck	Low	Heavy	Many	Long	High

Figure 1 - Truck and Drone Complementary. Source: Chung, Sah and Lee (2020)

In the context of ongoing urbanization, rapid growth in direct e-commerce delivery, increasing and congestion level, these UAV-based benefits are mainly pronounced in urban areas, reducing delivery time, and increasing the responsiveness of logistics system. Many prominent industry players already noticed these benefits, as an example, Amazon, Google Wing, United Parcel Service (UPS), and Rakuten, which have been developing and testing drone delivery models, and recently started regular commercial drone deliveries, case of UPS (Moshref-Javadi et al., 2021).

This innovative solution in logistics impacts economic and environmental aspects and have gain interest among customers and logistic operators of truck-based drone delivery system. As such, the existent technology can be combined with new ones leading to new possible incremental innovation in delivery system, among which truck-drone delivery is promising (Baldisseri et al., 2022).

This hybrid truck-drone delivery system has applications in several vital applications such as: natural disaster with transportation network, to collect crucial information in emergency mission situation; emergency aid, facilitating, making quick and flexible while reducing the worker exposure to danger; first healthcare aid; intelligence, surveillance and reconnaissance (ISR) to visit a set of location; vaccines, water purification tablet and medicines transportation; delivery with the drones resupplying (Gonzalez-R et al., 2020).

So, this study aims to study recent articles that develop effective and efficient delivery application algorithms, as Elshaer and Awad (2020) pointed out metaheuristic methodology is widely recognized as efficient approach for many hard optimization problems, including VRP. In the way of improving modeling techniques and solutions, the interest is to analyze articles that use recent modeling techniques and propose a conceptual model that generalize this modeling techniques. For researchers, it will be giving an entry point into the topic, direction for future research and further reading. For practitioners, a guidance on some state-of-the-art literature and a conceptual model that can be used in truck and drone delivery intelligent system. Then, the main contribution can be summarized as follows:

- Review state-of-the-art article related to VRPD to address main steps in problem solving.
- Propose a conceptual model to implement solution of VRPD.

Even though, complex drone operation usually involves several tasks and has many barriers to be addressed that is out of scope of this article, such as:

- Military and Security Applications, because there is no sharp between military and civil applications and methods can be usually used in both contexts.
- Obstacle-avoiding path planning.
- Criteria to select the most suitable characteristic of drones.
- Cargo type and weight selection.
- Regulatory, environmental, economic influence.

The remainder of this paper is organized as follows: section 2 presents the theorical basis; section 3 defines the methodology used to address the problem; section 4 shows the results analysis; section 5 concludes with some directions for future research.

2. THEORETICAL BASIS

Drones and trucks have advantages and disadvantages, such as the truck restriction to the road network that can result is dispatching delay, while the drone limited weight, package, flight, and battery capacity. So, the effectiveness and efficiency of Drone Operation (DO) is better when drones are combined with trucks in a drone and truck combined operation (DTCO), because it can reduce the need of truck driver, can leverage the advantages and disadvantages of each other's, allow for the parallelization of different delivery operations, can reduce the total time required to serve all customers (Chung, Sah and Lee, 2020; Agatz, Bouman and Schmidt, 2018). In the Figure , there is an example of five customer locations to be served from the depot in which two parallelized drones are doing truck job by serving two customer locations, reducing the distance travelled by the truck and the total time required to serve all customers.

As can be seen in Figure , two customers are served by drones performing a dashed arrow (fly arc – a pair of ordered vertices performed by a drone flight) instead of truck (drive arc), leaving the truck to serve the other customers. This parallelization of different delivery tasks can reduce the total time to delivery logistics, but this phenomenon needs new

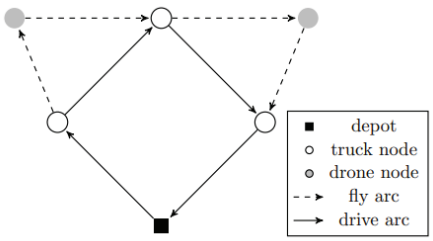


Figure 2 - Truck and Drone Routing Problem Example. Source: Agatz, Bouman and Schmidt (2018)

models and innovative algorithms to exploit the best potential benefits from this innovative technology (Agatz, Bouman and Schmidt, 2018).

Although there are many advantages of using drones in cooperation with trucks, there is lots of challenges to DTCO, one of this is the NP-hard nature (class of algorithms in which where is no known polynomial-time algorithm to the problem) of Vehicle Routing Problem (VRP), according to, a class of routing problem whose objective is to determine a set of optimal routes performed by vehicles with limited capacity to serve a given set of customers (Wang and Sheu, 2019).

It is important to identify the variants of VRP, which Macrina et al. (2020) classify into classes target of Routing Problem with Drones (RP-D): 1. TSP-D (travelling salesman problem with drones), when just one truck and one or more drones perform the delivery; 1.1. Flying Sidekick Travelling Salesman Problem (FSTSP) when there is synchronization between truck and drone; 1.2. Parallel Drone Scheduling Travelling Salesman Problem (PDSTSP), when there is not synchronization between truck and drone; 2. VRPD (Vehicle Routing Problem with Drones), when many trucks and many drones perform the delivery, as can be seen in the Figure .

In addition to identify the problem, there is also a necessity of improving modeling techniques and solutions methodologies as addressed by Chung, Sah and Lee (2020), in which the small DTCO problems (up to 10

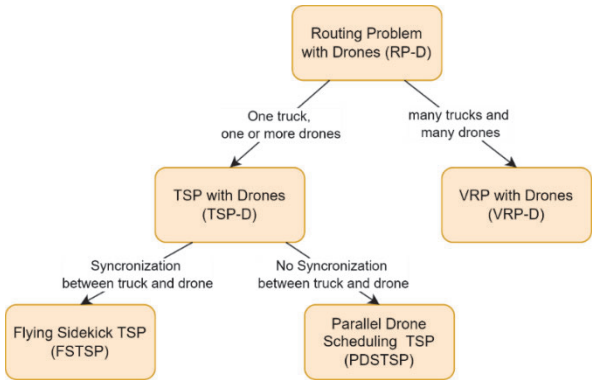


Figure 3 - Routing Problem with Drones. Source: Macrina et al. (2020).

customers) may be solved by exact algorithm within a reasonable time, but for relatively larger problems exact algorithms may not work and can experience a curse of dimensionality.

Table 1 - Metaheuristic Techniques in Routing Problem. Source: Research Data.

Author	*Category*	*Approach*	*Topic*
Sacramento, Pisinger and Ropke (2019)	Single-Solution Based	ALNS – variant of LNS	An ALNS metaheuristic to to solve FSTSP, a variation of TSP-D
Huang et al. (2022)	Population-based	ACO	An ACO metaheuristic to VRP-D
Euchi and Sadok (2021)	Population-based	GA	A GA metaheuristic to VRP-D

So as to define the main solution existents in the literature, Elshaer and Awad (2020), metaheuristic method to solve Vehicle Routing Problem into two categories: single-solution based, in which a single candidate is used to improve the solution and population-based, in which multiple candidates is used to improve the solution.

Then, it was selected to review in the next chapter one single-solution metaheuristic with high frequency of use in the literature and two population-based metaheuristics, because according to Elshaer and Awad (2020) they are one of the most frequently used in routing problems.

Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS), the third most frequently used single-solution metaheuristics, have been studied by Sacramento, Pisinger and Ropke (2019) in a context of a variation of RP-D, which there is synchronization between one truck and drones, also known as Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP). In addition, observed that when the number of customers increases, it is difficult to exact methods used by CPLEX to solve in a reasonable time, as CPLEX spends 17h to solve 12.05.1 instance, while ALNS solved in a couple of seconds.

On the contrary, the study of Euchi and Sadok (2021) proposed the most frequently used population-based metaheuristic according to Elshaer and Awad (2020), the Genetic Algorithm (GA) have chosen an initial population and have varied this population conforming to a variation of sweep local search heuristic, also known as hybrid GAxSweepLS algorithm in a context of VRPD, reaching efficient solution quality and execution time compared to the methods proposed in the literature of up to 84% in some cases.

Other most frequently used population-based metaheuristic based on Elshaer and Awad (2020) is Ant Colony Algorithm (ACO), in which Huang et al. (2022) have applied the in the context of VRP-D, obtaining a cost-saving of over 30% for large instances of VRP and solutions 1% optimal for small instances. Then, the main studies discussed in result chapter can be summarized in Table 1.

In brief, there is several ways to do logistic operation with truck and drone, as there are many variants of Routing Problem with Drones. Each variant has their context in which the most appropriate solution method depends on the solution-time and solution-quality, as an example exact technique and metaheuristic technique. To address some state-of-the art solutions to identify a pattern to construct a conceptual model, a sweep literature review was made as can be seen in Table 1.

3. METHODS

There are four categories of solution methodologies, according to Chung, Sah and Lee (2020), the exact method, heuristics, continuous approximation, and metaheuristics. The first one is the classical and well implemented in commercial solvers as CPLEX and GUROBI, but not efficient method to solve large instances, because the VRP and TSP based problem are known to belong to NP-hard algorithm class, as an example of the solution time of CPLEX and GUROBI solver for 10 customers DTCO problem spending several hours to be solved.

Table 2 - Analytical Comparison

Author	Solution Technique	Context	Benchmarking Instances	Algorithm Parameter
Sacramento, Pisinger and Ropke (2019)	ALNS	VRPD	Benchmark 1	PT
Euchi and Sadok (2021)	GA	VRPD	Benchmark 2	PD
Huang et al. (2022)	ACO	VRPD	Benchmark 3	PD

ALNS: Adaptive Large Neighborhood Search

GA: Genetic Algorithm

ACO: Ant Colony Optimization

Benchmark 1: Random benchmark generated by the paper

Benchmark 2: Two groups of benchmarks: the first set correspond to instances of Benchmark 1 and the second set correspond to different scenarios of VRPD simulated by the paper

Benchmark 3: three sets of Feeder VRP (FVRP) with 50,100 and 200 customers, created by (Huang et al., 2022b)

VRP: Vehicle Routing Problem

VRPD: Vehicle Routing Problem with Drones

PT – parameter tuning experiment, documented in (Sacramento, 2017) and in (Ropke & Pisinger, 2006)

PD – The author declares the Parameter Setting of the algorithm but didn't declare if it was optimized by some tool.

The heuristic method can help to solve bigger instance but can be limited because needs to do assumptions, as can be showed in Murray and Chu (2015), which assumes drone-eligible customer nodes selected and removed from the truck route. The other method is continuous approximation, that replace the numerical method to analytical technique, show the data by a concise summary (Chung, Sah and Lee, 2020).

On the other hand, the present study focuses on metaheuristics, a high-level methodology to find a good solution that is proved to be effective for several DTCO problems with few or no assumptions. So, aims to study recent articles with high frequency of use metaheuristic methodologies, according to Elshaer and Awad (2020).

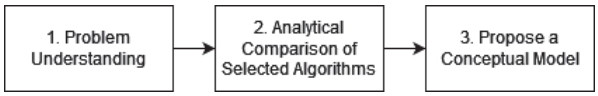


Figure 2 - Methodology used, adapted from Talbi (2009)

The analyze of implementations, algorithms parameter, pattern of solving VRP have been used to propose a conceptual model that has the purpose of generalize the methodologies studied. The methodology used is adapted from Talbi (2009), consisting in understand the problem, analyze the algorithms, and propose a conceptual model, as described in Figure 2.

4. RESULTS ANALYSIS

This section presents the conceptual model of state-of-the-art articles related to VRPD in a fluxogram with steps based on the these articles.

VRPD is a routing problem with a fleet of vehicles carries drones that leave for delivery and can be picked up by the those at the depot or one of the customer's locations objecting minimize the time required to serve all customers (Sacramento, Pisinger and Ropke, 2019). The techniques of problem-solving vary according to different strategies of exploration and exploitation. The ALNS is a single-based metaheuristic extension of the LNS algorithm that use the repair and destroy method with a weight adjusted dynamically during the search of solution. It was read other papers with different solution techniques to solve VRP problems, but they were discarded because weren't related of the VRPD problem of this study, as example the hybrid metaheuristic Tabu Search-Variable Neighborhood Descendent (Kyriakakis et al., 2022) and Greedy Random Adaptive Search Procedure (Bruglieri et al., 2022).

The Genetic Algorithm is a population-based metaheuristic with an initial set of solution (population) and, from the crossover, mutation, and selection operators, improve the solution until the defined number of interactions is reached. The Ant Colony Algorithm is also a population-based metaheuristic to solve hard combinatorial optimization problem, inspired by the foraging behavior of real ants, using a variable called pheromone and a function of updating pheromone as algorithm strategy to exploration and exploitation (Sacramento, Pisinger and Ropke, 2019; Euchi and Sadok, 2021; Huang et al., 2022)

To measure the metaheuristics, the benchmark used was based in datasets identified in the literature (Euchi and Sadok, 2021; Huang et al., 2022), and generated by the author (Sacramento, Pisinger and Ropke, 2019; Euchi and Sadok, 2021). Another step to analyze the performance is the parameter tuning, in which some studies just declared the value used in the algorithm (Euchi and Sadok, 2021; Huang et al., 2022), others declared there was a parameter tuning experiment (Sacramento, Pisinger and Ropke , 2019) that, in spite of not mentioned, this parameters can be tuned by tools as iRace (López-Ibáñez et al., 2016) and BNT (Chaves and Lorena, 2021).

From the analytical comparison in Table 2 and the theorical basis, it can be proposed a conceptual model of solution techniques. problems, defining the problem, selecting the instances, choosing the solution technique to solve the problem, parameter optimization to reaching good results, as in Figure 3.

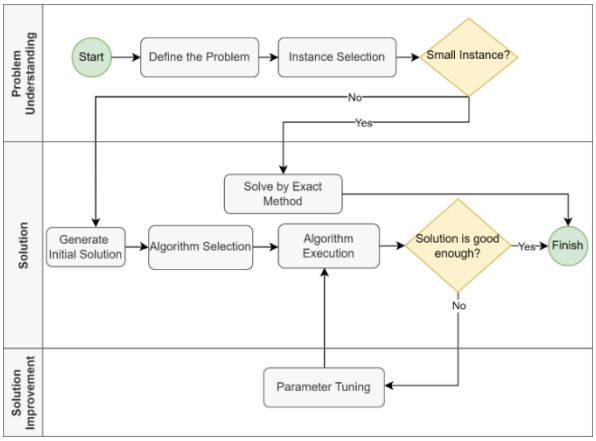


Figure 3 - Conceptual Model.
Source: Research data.

According to the Figure 3, the first phase is the problem understanding, defining the problem, choosing the instance according to the defined problem. The second phase is to select the more appropriate technique, if the instance is small, choose the exact method because there is not much computational effort. On contrary, the approximate method appropriate to find good solution is the metaheuristic, consisting in generate initial solution, select the better algorithm according to the problem defined. In the final phase, the solution can be improved by parameter tuning tool, to get better solutions.

To sum up, high-quality Vehicle Routing Problem with Drones was identified in the literature to construct the conceptual model of the Figure 3 following three phases: problem Understanding, defining the problem and selecting the instances; solution, selecting, executing the algorithm based on the problem understanding; solution Improvement, improving the solution using parameter tunning.

The study of (Talbi, 2009) was used as reference of some steps in the conceptual model to get a methodology and represent as the diagram in Figure 3. Other more recent study of (Osaba et al., 2021) propose a methodology to real world optimization problem giving recommendations and bad practices observed in the literature. Considering the theorical gap of improving modeling techniques and solution methodologies presented in the study of Chung, Sah and Lee (2020), this present paper can contribute to future research, which the conceptual model represented as a flow diagram presented in the Figure 3 can be extended with real world perceptions and others techniques as the combinations of hybrid metaheuristics, artificial intelligent techniques and others, giving a more generical methodology.

Restoring the drone issue of being used in a logistic context of delivery problem combined with ground vehicles, this structured methodology certainly will be helpful to be used in the future of logistic and air transport operation.

5. CONCLUSIONS

Therefore, drones have an innovative potential to be the future of air transportation complementing the capabilities of the already existing ground vehicle with drone main capabilities such as speed, no need to be in traffic congestion, low energy consumption.

This logistic operation is a research field with several applications, among which truck-drone delivery is an innovative promise technology that is expected to reach billions of dollars in the next years.

Some articles more recent and with the state-of-the art result was analyzed and identified key steps to construct a conceptual model that aims to generalize metaheuristic implementation of VRPD. In addition to the literature perspective, the practice perspective is to guide future researchers to a methodology of implementation of VRPD, not encountered in the literature.

In the future studies, the conceptual model can be enhanced by other steps, variables, and methods, such as artificial intelligence, simulation, hybrid metaheuristic towards a more general and complete conceptual model.

References

Agatz, N., Bouman, P., & Schmidt, M. (2018). Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone. *Transportation Science*, *52*(4), 965–981.

Baldisseri, A., Siragusa, C., Seghezzi, A., Mangiaracina, R., & Tumino, A. (2022). Truck-based drone delivery system: An economic and environmental assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *107*, 103296. https://doi.org/10.1016/J.TRD.2022.103296

Bruglieri, M., Ferone, D., Festa, P., & Pisacane, O. (2022). A GRASP with penalty objective function for the Green Vehicle Routing Problem with Private Capacitated Stations. *Computers & Operations Research*, *143*, 105770. https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105770

Chaves, A. A., & Lorena, L. H. N. (2021). An Adaptive and Near Parameter-Free BRKGA Using Q-Learning Method. *2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2021 - Proceedings*, 2331–2338. https://doi.org/10.1109/CEC45853.2021.9504766

Chung, S. H., Sah, B., & Lee, J. (2020). Optimization for drone and drone-truck combined operations: A review of the state of the art and future directions. *Computers and Operations Research*, *123*. https://doi.org/10.1016/J.COR.2020.105004

Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers and Industrial Engineering*, *140*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106242

Euchi, J., & Sadok, A. (2021). Hybrid genetic-sweep algorithm to solve the vehicle routing problem with drones. *Physical Communication*, *44*. https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101236

Gonzalez-R, P. L., Canca, D., Andrade-Pineda, J. L., Calle, M., & Leon-Blanco, J. M. (2020). Truck-drone team logistics: A heuristic approach to multi-drop route planning. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *114*, 657–680. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.030

Huang, S. H., Huang, Y. H., Blazquez, C. A., & Chen, C. Y. (2022a). Solving the vehicle routing problem with drone for delivery services using an ant colony optimization algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, *51*. https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101536

Huang, S. H., Huang, Y. H., Blazquez, C. A., & Chen, C. Y. (2022b). Solving the vehicle routing problem with drone for delivery services using an ant colony optimization algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, *51*. https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101536

Kyriakakis, N. A., Sevastopoulos, I., Marinaki, M., & Marinakis, Y. (2022). A

hybrid Tabu search – Variable neighborhood descent algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem with time windows in humanitarian applications. *Computers and Industrial Engineering*, *164*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107868

López-Ibáñez, M., Dubois-Lacoste, J., Pérez Cáceres, L., Birattari, M., & Stützle, T. (2016). The irace package: Iterated racing for automatic algorithm configuration. *Operations Research Perspectives*, *3*, 43–58. https://doi.org/10.1016/J.ORP.2016.09.002

Macrina, G., di Puglia Pugliese, L., Guerriero, F., & Laporte, G. (2020). Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *120*. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102762

Moshref-Javadi, M., Hemmati, A., & Winkenbach, M. (2021). A comparative analysis of synchronized truck-and-drone delivery models. *Computers and Industrial Engineering*, *162*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107648

Murray, C. C., & Chu, A. G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *54*, 86–109. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2015.03.005

Osaba, E., Villar-Rodriguez, E., del Ser, J., Nebro, A. J., Molina, D., LaTorre, A., Suganthan, P. N., Coello Coello, C. A., & Herrera, F. (2021). A Tutorial On the design, experimentation and application of metaheuristic algorithms to real-World optimization problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, *64*, 100888. https://doi.org/10.1016/J.SWEVO.2021.100888

Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, *72*(4), 411–458. https://doi.org/10.1002/NET.21818

Rojas Viloria, D., Solano-Charris, E. L., Muñoz-Villamizar, A., & Montoya-Torres, J. R. (2020). Unmanned aerial vehicles/drones in vehicle routing problems: a literature review. *International Transactions in Operational Research*, *28*(4), 1626–1657. https://doi.org/10.1111/itor.12783

Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science*, *40*(4), 455–472. https://doi.org/10.1287/TRSC.1050.0135

Sacramento, D. (2017). *Heuristics for solving the Drone-Vehicle Routing Problem (Masters Thesis)*. Technical report, Technical University of Denmark.

Sacramento, D., Pisinger, D., & Ropke, S. (2019). An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *102*, 289–315. https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.02.018

Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics : from design to implementation*. John Wiley & Sons.

Wang, Z., & Sheu, J. B. (2019). Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, *122*, 350–364. https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005

ANÁLISE DO IMPACTO DA PANDEMIA DO COVID-19 NA MOVIMENTAÇÃO DE PASSAGEIROS EM AEROPORTOS QUE SERVEM CIDADES TURÍSTICAS BRASILEIRAS

Ivaciane de Q. Magalhães[1], Anderson R. Correia[1], Michelle C. G. S. P. Bandeira[2], Giovanna M. R. Borille[1],
[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica
[2]Universidade Federal de Goiás

* ivaciane@gmail.com, correia@ita.br, michelle.galvao@ufg.br, ronzani@ita.br

PAPER ID: SIT122

ABSTRACT

The air transport sector experienced a disruption in demand during the health crisis triggered by COVID-19. Of all the economic sectors dependent on air transport, Brazilian tourism has suffered its biggest drop in recent decades. In order to analyze the effect of passenger movement at airports that serve tourism-dependent cities in Brazil, this work presents a methodology for studying the impact of COVID-19 on airports that receive the most foreign tourists in Brazil. The methodology relies on the analysis of passenger movement data from the National Civil Aviation Agency in the period from 2015 to 2022. The study uses the moving average tool and seasonally adjusted data to verify passenger movement trends in the analyzed years. It was found that the reduction of foreign passengers in the country was 81.4% below the historical average in January 2021, while the total movement of passengers was 39.5% below for the same period. The proposed methodology proved to be efficient for analyzing the movement of passengers in airports in the face of a collapse in demand.

Keywords: Seasonally adjusted parameters, Moving averages, Air passenger, COVID-19.

ACKNOWLEGDEMENTS

The authors would like to thank CAPES and SAC for their financial support.

1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo global entrou em crise em 2020 devido à crise sanitária desencadeada pelo COVID-19. Dentre todos os setores dependentes do transporte aéreo, pode-se observar que um dos mais impactados foi o setor do turismo. No geral, segundo a OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2021), o PIB (Produto Interno Bruto) global caiu em 4,2% em 2020, enquanto a demanda por voos no transporte aéreo sofreu uma redução de 65.9% (IATA, 2021). Ao analisar o setor do turismo é possível notar que a queda foi ainda maior, 74% de acordo com a WTO (*World Tourism Organization*, 2021). Observa-se que há uma grande relação entre a diminuição do turismo e o transporte de passageiros aeroportuários. Segundo Eccles (2020), é muito difícil analisar como será o setor de turismo no pós COVID-19 no atual momento. Conforme o autor, as companhias aéreas e os governos precisarão rever quais serão as melhores estratégias para alavancar o setor do turismo.

Com a redução do número de passageiros nos aeroportos, muitas companhias aéreas aumentaram os valores das passagens. Forsyth *et al*., (2020) analisaram as mudanças dos valores das passagens em relação a demanda durante a crise da COVID-19 e verificaram que houve um aumento expressivo nas mesmas em quase todas as partes do mundo. Também observaram que ocorreu uma diminuição da procura pelo setor do turismo. Os autores supracitados argumentaram ainda que, o reajuste da tarifa de manutenção do aeroporto não deve ser repassado aos passageiros que frequentam o aeroporto durante uma crise. Portanto, as companhias aéreas necessitam rever sua política de preço das passagens e serviços para estimular o retorno do turismo global.

Houve declínio significativo na movimentação dos passageiros nos países e cidades turísticas do mundo todo durante a crise. Segundo Arellana *et al.,* (2020), por ser turística, a cidade de Cartagena na Colômbia, por exemplo, sofreu uma baixa de quase 96% na demanda de transporte aéreo. Enquanto para Sandeep *et al.,* (2020), o setor de turismo na Índia deve levar anos para se recuperar.

Segundo dados da WTO (*World Tourism Organization*, 2021) o turismo é responsável por 10,4% da economia mundial. No Brasil, o setor turismo corresponde a 8% do PIB brasileiro (MTUR, 2020). O impacto de uma diminuição nesse setor pode levar a um efeito cascata na economia brasileira, atingindo diversos setores e levando a um empobrecimento da população. Dado a importância desse setor, é necessário a criação de modelos que auxiliem as tomadas de decisões pelos gestores públicos (Forsyth *et al*., 2020).

No Brasil, existem poucas pesquisas que correlacionam a crise da COVID-19 com os aeroportos que servem as cidades turísticas. Nesse sentido, esse estudo visa responder à pergunta de pesquisa: qual o impacto na demanda de passageiros dos aeroportos, que servem cidades turísticas brasileiras, durante a crise da COVID-19? O presente trabalho tem como objetivo geral verificar a demanda de passageiros totais e estrangeiros nesses aeroportos durante o estágio inicial da pandemia no Brasil. Para alcançar o objetivo, foi feito um corte temporal sobre a movimentação de passageiros no período de 2015 a 2022. Esse trabalho visa contribuir também com o desenvolvimento de um método científico capaz de analisar a movimentação do transporte aéreo em cidades turísticas durante um período de crise. O modelo poderá ser útil na previsão de novos cenários de colapso do setor aéreo nacional desencadeadas por uma crise global.

A seguir apresenta-se a revisão da literatura, na seção 2, que aborda estudos sobre os efeitos do COVID-19 no setor do transporte aéreo. A seção 3 aborda sobre a metodologia proposta para a análise dessazonalizada da movimentação dos passageiros. A seção 4 destaca os resultados deste estudo; e por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Vários autores, recentemente, abordaram o efeito do COVID-19 sobre a economia. Algumas dessas análises foram feitas a partir do cenário global. Um desses trabalhos é apresentado em Hall *et al*. (2020), em que os pesquisadores abordaram o impacto da pandemia sobre o setor turístico. Outro trabalho similar é o de Forsyth *et al*. (2020) que verificou o valor do preço da passagem aérea durante a crise. Análises mais específicas foram feitas por outros autores, como é o caso de M *et al*. (2020) e Arellana *et al*. (2020) que estudaram os impactos econômicos na Índia e na Colômbia respectivamente. Verifica-se também artigos de previsões de situações econômicas no pós pandemia, que é o caso de Eccles (2020).

É possível notar que um dos setores mais afetados durante a pandemia foi o setor do transporte aéreo, sendo, portanto, importante analisar o que pode ser feito para impulsionar a recuperação econômica desse setor no futuro pós-crise. Nesse sentido, há uma convergência na literatura para que políticas públicas sejam implementadas pelos governos visando subsidiar o setor do transporte aéreo até que haja uma normalização da demanda (Arellana *et al.*, 2020; Eccles, 2020; Forsyth *et al.*, 2020).

Tabela 1. Revisão sinótica de literatura.

CARACTERÍSTICAS	Hall *et al*. (2020)	M *et al*. (2020)	Eccles (2020)	Arellana *et al*. (2020)	Forsyth *et al*. (2020)
Efeitos do COVID-19 na economia	Analisaram o impacto no setor turístico global.	Analisaram a efeito econômico e social na Índia	Fez uma previsão do pós-COVID.	Estudaram o impacto no sistema de transportes na Colômbia.	Analisou a resposta do preço das passagens como resposta ao colapso do setor aéreo.
Propostas para o setor de transporte aéreo pós-crise	Não apresentaram nenhuma proposta	Não abordaram o setor aéreo pós-crise.	Indicou que fundos e incentivos governamentais devem ser criados para aumentar a demanda de turistas no pós-COVID.	Mencionaram que o governo deveria manter incentivos as empresas aéreas até que a economia se estabilizar-se.	Sugeriram que os governos possam manter as companhias aéreas até que haja uma normalização da demanda.
Sugestões de financiamento do Governo para manter o setor aéreo durante a crise	Mencionaram que durante a crise de 2008 existiu incentivo do governo para o turismo. O que não foi observado na crise do COVID.	Sugeriram que o governo diminuísse os impostos para compensar o aumento de custo das operações de aeronaves.	Propôs que os governos pudessem intervir nas companhias áreas que estiverem na eminência de concordata.	Propuseram que o governo fornecesse incentivos econômicos as empresas aéreas.	Mencionou que os governos devem criar uma linha de crédito para socorro de empresas aéreas.
Análise do impacto social	Não abordaram o aspecto social, mas sim o aspecto sustentável do turismo	Indicou que houve uma queda de 11% no comércio, transporte, comunicação e prestação de serviços	Mencionou que os governos devem preparar políticas públicas para evitar que a população que é dependente do turismo não migre para outras áreas.	Analisaram que a redução da capacidade do transporte pública para o nível de 35%, teria um impacto econômico muito negativo para as classes mais pobres da população.	Não abordou os impactos sociais da variação do preço das passagens no ponto de vista do passageiro.

Alguns autores sugerem que o apoio das políticas públicas é necessário para enfrentar o cenário pós crise. Segundo Hall *et al*. (2020), durante crise hipotecária americana de 2008 houve incentivos de políticas públicas para o turismo, porém, durante o período de pandemia não foi observado o auxílio de políticas públicas.

Para Arellana *et al*.(2020) e Forsyth *et al*. (2020) esse apoio também deveria ser dado na forma de incentivos econômicos para as empresas aéreas, uma das propostas seria a criação de uma linha de crédito para auxílio de empresas áereas. Eccles (2020), vai um pouco mais além e sugere que o governo deveria intervir nas companhias áreas que estiverem na eminência de concordata. M. *et al*. (2020), indica que os governos deveriam reduzir os impostos para compensar o aumento de custo das operações de aeronaves. É importante verificar também qual o impacto social que o colapso econômico pode trazer no setor dependente do transporte aéreo como é o caso do turismo. Segundo Arellana *et al.* (2020), a redução da capacidade do transporte pública para o nível de 35%, teria um impacto econômico muito negativo para as classes mais pobres da população. M. *et al*.(2020), indicaram que na Índia ocorreu uma queda de 11% no comércio, no transporte, na comunicação e na prestação de serviços. Para Eccles (2020), os governos devem propor políticas públicas para evitar que a população dependente do turismo não migre para outros setores.

Uma síntese comparativa desses estudos encontra-se na Tabela 1 em forma de revisão sinótica dos parágrafos previamente citados e seus pontos em comum.

3. METODOLOGIA

Apresenta-se nesta seção a descrição dos métodos aplicados na análise dos dados de movimentação de passageiros.

Como a demanda de passageiros, domésticos e internacionais, varia ao longo dos anos devido aos diversos fatores culturais, econômicos, e sociais, o estudo dos dados de movimentação deve levar em consideração fatores de sazonalidade. Como a série de dados a ser apresentada possui o fator tempo em sua composição, adota-se dois modelos para verificar o efeito temporal. O primeiro é o de parâmetros dessazonalizados variantes no tempo, descrito por Hylleberg (1986). O segundo, são as médias móveis, tradicionalmente aplicadas em dados econômicos (Chiarella et al., 2006).

Segundo Hylleberg (1986), a análise de sazonalidade feita através de parâmetros dessazonalizados variantes no tempo é realizada em quatro etapas: i) calcular a média móvel centrada; ii) determinar o índice de sazonalidade com irregularidades; iii) estimar o índice sazonal corrigido; e por último, iv) avaliar os dados corrigidos. A média móvel central por si só é um parâmetro de análise temporal de dados, conseguindo identificar possíveis tendências na análise dos dados (Chiarella *et al*., 2006). Para o presente trabalho adota-se primeiramente o cálculo da média móvel centrada anual, ou seja, de doze períodos. A Média Móvel centrada (*MM*) anual para um determinado mês pode ser descrita como apresentada na Equação (1):

$$MM_i = \frac{\sum_{j=i-5}^{i+6} \text{dados}_j}{12} \quad (1)$$

sendo *i* e *j* numerais relativos aos meses (0, janeiro, 1, fevereiro, ... até 11, dezembro).
No segundo passo deve-se calcular o índice de sazonalidade com irregularidades. Esse índice (IS_{irre}) é obtido através da divisão dos dados de cada mês em relação a MM (Equação 2). Ou seja:

$$IS_{irre,i} = \frac{dados_i}{MM_i} \quad (2)$$

Em seguida, o índice sazonal corrigido $IS_{corr,i}$ é calculado através da média do IS_{irre} para todos os meses da série temporal (Equação 3). Portanto:

$$IS_{corr,i} = \frac{\sum_{j=i}^{n} dados_{i,j}}{n} \quad (3)$$

sendo *n* o número de períodos da série temporal.

Finalmente, os dados corrigidos são obtidos através do produto entre o IS_{corr} pelos *dados*. Assim:

$$Dados_{corr,i} = IS_{corr,i} \times Dados_i \quad (4)$$

A metodologia proposta está representada no fluxograma da Figura 1. Três passos são adotados para obtenção dos resultados: i) Levantamento das cidades turísticas; ii) coleta dos dados de movimentação de passageiros da ANAC, e iii) análise de sazonalidade.

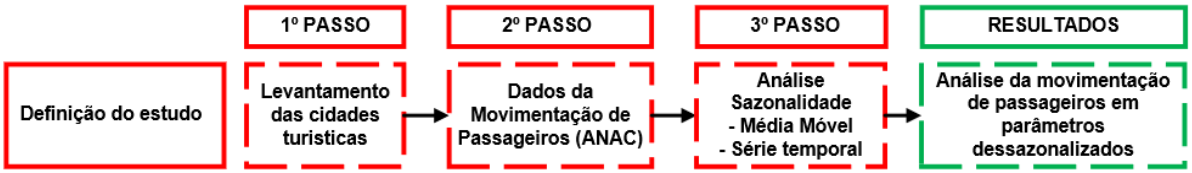


Figura 1. Fluxograma do Desenvolvimento Metodológico.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Essa seção aborda os resultados frente a movimentação de passageiros nos aeroportos dos principais destinos turísticos no Brasil durante a pandemia do COVID-19.

Segundo dados do Ministério do Turismo (MTUR, 2020), entre 2015 e 2019, 20 cidades concentraram a maior parte dos principais destinos de turistas internacionais no Brasil. A Tabela 2 apresenta essas cidades e seus respectivos Estados, o código ICAO (*International Civil Aviation Organization*) dos aeroportos que servem a esses municípios.

Alguns aeroportos servem mais de uma cidade, visto que esses aeroportos possuem porte internacional. Cinco desses municípios não dispõem de infraestrutura aeroportuária. Desse modo, levou-se em consideração o aeroporto mais próximo geograficamente dessas cidades.

Observou-se que há picos na demanda todos os meses de junho. Isso se deve principalmente as férias escolares e o verão no hemisfério sul. Um fator interessante é análise da média móvel de doze períodos, em que se observa que a tendência representada pela MM (12). A demanda por passageiros havia caído durante a crise de 2015 a 2017 e estava em um período de retomada entre 2017 e 2020. Em 2020 quando a demanda alcançou o nível de 2015, manifesta-se em escala global a crise do COVID-19. É interessante notar que a demanda total de passageiros cai vertiginosamente em abril de 2020 correspondendo a uma redução de 94,3% na comparação anual e 92,6% em relação a janeiro do mesmo ano. A partir de então, iniciou-se um processo de recuperação até janeiro de 2021. No entanto, os patamares seguem cerca de 39,5% abaixo da média anual. Apresenta-se na Figura 2 os dados da ANAC (2021) compilados para a movimentação total de passageiros (embarque, desembarque e conexões) dos aeroportos apresentados na Tabela 2.

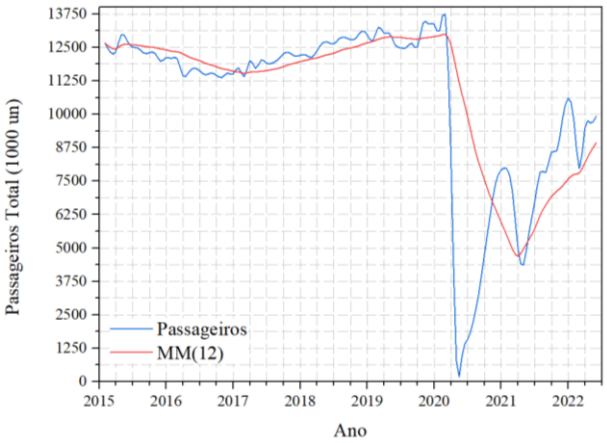


Figura 2. Movimentação de passageiros dessazonalizada (embarque, desembarque e conexões) nos principais aeroportos internacionais do País.

Tabela 2. Aeroportos internacionais que servem cidades turísticas e regiões próximas

CIDADE/ESTADO	NOME DO AEROPORTO	SIGLA ICAO
Angra dos Reis/RJ	Aeroporto Internacional Tom Jobim	SBRJ
Armação dos Búzios/RJ	Aeroporto Internacional Tom Jobim	SBRJ
Balneário Camboriú/SC	Aeroporto Internacional Hercílio Luz	SBFL
Belém/PA	Aeroporto Internacional Júlio Cezar Ribeiro	SBBE
Bombinhas/SC	Aeroporto Internacional Hercílio Luz	SBFL
Brasília/BR	Aeroporto Internacional Presidente Juscelino Kubitschek	SBBR
Campinas/SP	Aeroporto Internacional de Viracopos	SBKP
Curitiba/PR	Aeroporto Internacional Afonso Pena	SBCT
Florianópolis/SC	Aeroporto Internacional Hercílio Luz	SBFL
Fortaleza/CE	Aeroporto Internacional de Fortaleza - Pinto Martins	SBFZ
Foz do Iguaçu/PR	Aeroporto Internacional das Cataratas	SBFI
Maceió/AL	Aeroporto Internacional Zumbi dos Palmares	SBMO
Natal/RN	Aeroporto Internacional Governador Aluízio Alves	SBSG
Parati/RJ	Aeroporto Internacional Tom Jobim	SBRJ
Porto Alegre/RS	Aeroporto Internacional Salgado Filho	SBPA
Recife/PE	Aeroporto Internacional Gilberto Freyre	SBRF
Rio de Janeiro/RJ	Aeroporto Internacional Tom Jobim	SBRJ
Salvador/BA	Aeroporto Internacional Dep. Luís Eduardo Magalhães	SBSV
São Paulo/SP	Aeroporto Internacional Deputado Freitas Nobre	SBSP
Guarulhos/SP	Aeroporto Internacional Governador André Franco Montoro	SBGR

Em janeiro de 2021 novas restrições começam a ser impostas, e a demanda começa a sofrer nova diminuição. Observa-se que há uma queda significativa na demanda aérea. A demanda de passageiros reduz de em torno de 7.5 milhões de passageiros totais por mês para 4.5 milhões, ou seja, uma redução de 40% em relação a janeiro de 2021. Em agosto de 2021, com o relaxamento das restrições sanitárias, observou-se uma recuperação da demanda aos patamares de janeiro de 2022. O que se observa atualmente é que o transporte aéreo no País continua em recuperação em direção aos níveis obtidos em fevereiro de 2020. No entanto, observa-se que a demanda ainda segue 27% abaixo do pico registrado em janeiro de 2020.

O perfil da demanda turística pode ser mais bem estudado quando se observa a movimentação de passageiros internacionais. A Figura 3 apresenta a movimentação de passageiros internacionais dessazonalizada considerando embarque, desembarque e conexões nos principais aeroportos internacionais do Brasil. Como pode-se notar, apesar da crise interna no Brasil, o perfil de passageiros internacionais seguia em plena expansão até o início da pandemia. Ao analisar os dados da média móvel, o perfil da demanda era de em torno de 1.350.000 passageiros mensais em 2015 e 1.650.000 em 2020. No entanto, essa demanda sofre mais com as restrições de circulação de pessoas impostas pelas autoridades sobre a população, do que a demanda interna.

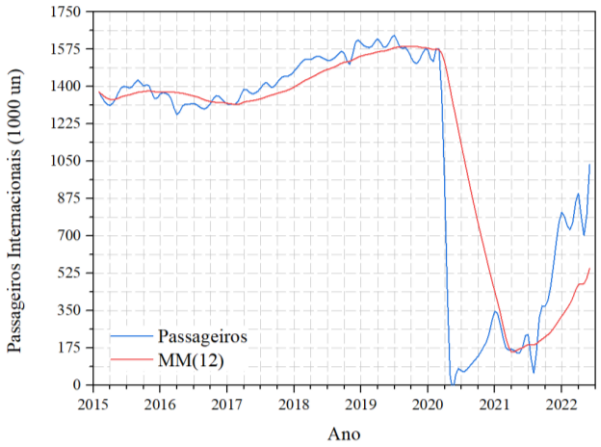


Figura 3. Movimentação de passageiros internacionais dessazonalizada (embarque, desembarque e conexões) nos principais aeroportos internacionais do País.

O número de passageiros internacionais em aeroportos brasileiros foi reduzido em 97,4 % na comparação anual de 2015 a 2021, e em 96,3% em relação ao último mês de fevereiro de 2020. Apesar da retomada gradual das atividades econômicas iniciada a partir de abril de 2020, o volume de passageiros internacionais continuou bem restrito apesar da retomada interna.

Observou-se que em janeiro de 2021 a movimentação de passageiros internacionais atingiu 350.000 passageiros/mês, representando ainda uma retração de 78% em relação aos níveis de janeiro de 2020. A retomada mais significativa tem início a partir

de agosto de 2021. Conforme os dados apresentados, a movimentação segue em plena recuperação. Atualmente, a movimentação segue 33% menor que a atingida em março de 2020.

Na Figura 4 apresenta-se a movimentação de passageiros total dessazonalizada nos aeroportos de SBBR, SBGR, SBKP e SBSP. Esses terminais possuem as maiores movimentações de passageiros do País. Ao observar o aeroporto de Guarulhos (SBGR), após a queda da primeira onda da COVID-19, verificou-se uma recuperação de 52% de sua movimentação relativa a março de 2020. No entanto, a segunda onda da pandemia afetou novamente o funcionamento do aeroporto, levando-o a um nível 42% inferior em relação a janeiro de 2021.

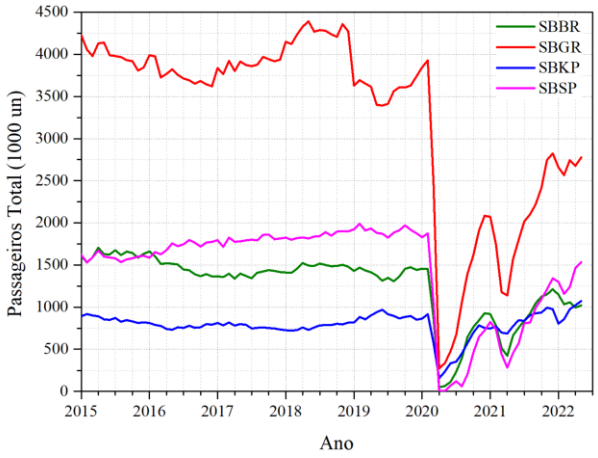


Figura 4. Movimentação de passageiros totais dessazonalizada (embarque, desembarque e conexões) nos principais aeroportos do país.

Atualmente a demanda dessazonalizada de passageiros ainda está cerca de 31% abaixo da movimentação esperada para o período. Já o aeroporto de Congonhas apresenta uma demanda cerca de 17,0% inferior em relação aos níveis pré-pandemia. Enquanto o aeroporto de Brasília apresenta uma demanda 33% inferior. No entanto, um detalhe interessante na análise é em relação ao aeroporto de Viracopos, SBKP. Esse aeroporto em específico apresentou comportamento diferente em relação aos seus pares. Observa-se que o aeroporto SBKP não foi impactado pela segunda onda da COVID-19, e atualmente tem demanda superior os níveis pré-pandemia. A análise verificou que esse aeroporto tem demanda de 1.000.000 de passageiros mensais, considerando embarque, desembarque e conexões. Esse valor é cerca de 25% superior em relação a março de 2020. A Figura 5 mostra a evolução da demanda de passageiros dessazonalizada para os aeroportos SBBE, SBCT, SBFI, SBFL e SBFZ da Tabela 1. Observa-se que nos aeroportos SBFL e SBBE, houve uma lateralização da movimentação de passageiros no período de 2015 a 2020. Atualmente a demanda nesses aeroportos segue em torno de 10% inferior aos níveis pré-pandemia. Já para os aeroportos SBFZ e SBFI apresentaram crescimento durante o período de 2015 a 2020, enquanto o aeroporto SBCT apresentou um decréscimo de movimentação no mesmo período. Esses aeroportos apresentaram em janeiro de 2021 uma redução na movimentação de passageiros de cerca de 40% em relação ao mesmo período de 2020. Após a segunda onda da COVID-19, esses aeroportos se encontram cerca de 23% abaixo da movimentação pré-pandemia.

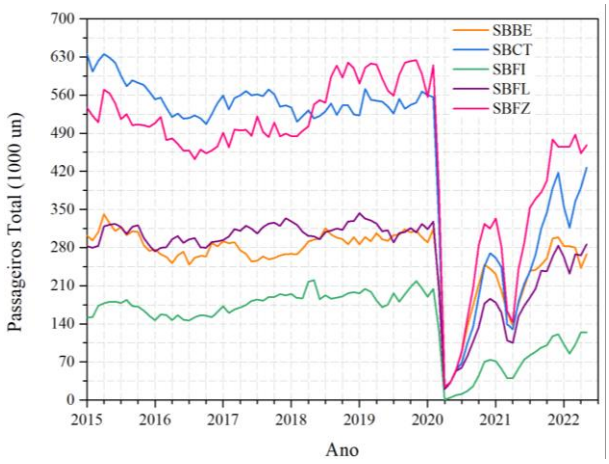


Figura 5. Movimentação de passageiros totais dessazonalizada (embarque, desembarque e conexões) nos principais aeroportos do país.

A Figura 6 mostra a evolução da demanda de passageiros dessazonalizada para os aeroportos SBMO, SBPA, SBRF, SBRJ, SBSG e SBSV da Tabela 1. Observa-se que os aeroportos SBRJ, SBSV e SBPA vinham de demanda constante no período de 2015 a 2020. Após a redução da primeira onda, o volume de passageiros retornou para o nível de 25% abaixo da demanda pré-pandemia em Janeiro de 2021. Atualmente a demanda no aeroporto SBRJ já supera os níveis dessazonalizados de antes da pandemia. Já os aeroportos SBSV e SBPA possuem demanda cerca de 20% abaixo

do nível médio de 2015 a 2020. Os aeroportos de SBSG, SBRF e SBMO apresentaram demanda aproximadamente constante durante o período de 2015 a 2020. Nesses aeroportos a demanda já foi reestabelecida aos patamares pré-pandemia. É interessante notar que 10 dos 20 aeroportos analisados ainda com a demanda reduzida em mais de 25% em relação a demanda média pré-pandemia. 9 aeroportos já recuperaram a demanda. O destaque nessa lista é o aeroporto de Viracopos, SBKP, que atualmente apresenta demanda superior aos níveis pré-pandemia.

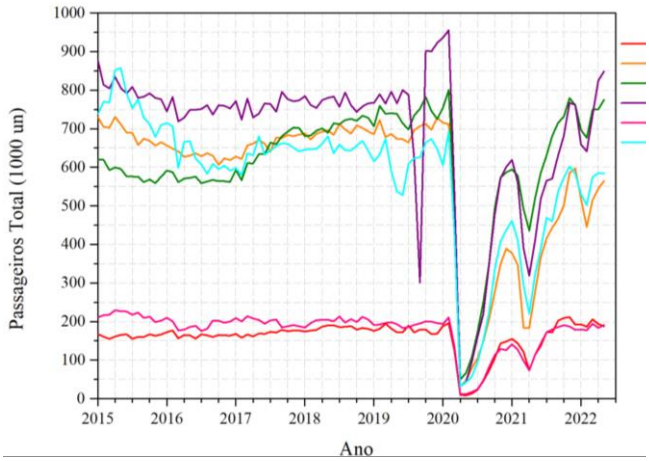


Figura 6. Movimentação de passageiros totais dessazonalizada (embarque, desembarque e conexões) nos principais aeroportos do país.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalhou analisou o perfil da movimentação aérea de passageiros nos 20 aeroportos que servem os principais destinos turísticos no País. Para isso, propôs-se uma metodologia de análise usando a combinação entre dados dessazonalizados e a média móvel de doze períodos para análise do volume médio de passageiros no período. Esse método visa ajustar os dados para evitar distorções levando a análises incorretas.

Observou-se que, de modo geral, a movimentação de passageiros chegou a cair 94,3% em relação a abril de 2019. Em seguida, teve uma leve recuperação, mas caiu novamente após janeiro de 2021 devido a segunda onda da COVID-19. Atualmente metade dos aeroportos analisados ainda apresentam demanda inferior a 25% da demanda média esperada para o período. Cerca de 9 aeroportos já recuperaram a demanda pré-pandemia. Já o aeroporto de Campinas, SBKP, aumentou suas atividades e atualmente tem demanda superior aos níveis pré-pandemia. Isso indica que na região de São Paulo pode ter ocorrido uma modificação no perfil da demanda de usuários principalmente devido ao aumento da movimentação de passageiros no Aeroporto Internacional de Campinas/Viracopos.

Considerando o perfil da demanda turística internacional, o Brasil ainda permanece cerca de 33% abaixo do volume esperado para o período. Assim, pode-se afirmar que o setor do turismo foi um dos mais impactados pela pandemia, e até o presente momento não se recuperou da crise econômica desencadeada pela COVID-19.

Referências

ANAC, A.N. de A.C., 2021. Anuário do Transporte Aéreo - Graficos e Tabelas. Brasília.

Arellana, J., Márquez, L., Cantillo, V., 2020. COVID-19 Outbreak in Colombia: An Analysis of Its Impacts on Transport Systems. J. Adv. Transp. 2020, 1DUMMMY. https://doi.org/10.1155/2020/8867316

Chiarella, C., He, X.Z., Hommes, C., 2006. A dynamic analysis of moving average rules. J. Econ. Dyn. Control 30, 1729–1753. https://doi.org/10.1016/j.jedc.2005.08.014

Eccles, G., 2020. Airlift and tourism development: two sides of the same coin. Worldw. Hosp. Tour. Themes 12, 739–745. https://doi.org/10.1108/WHATT-07-2020-0075

Forsyth, P., Guiomard, C., Niemeier, H.M., 2020. Covid −19, the collapse in passenger demand and airport charges. J. Air Transp. Manag. 89, 101932. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101932

Hall, C.M., Scott, D., Gössling, S., 2020. Pandemics, transformations and tourism: be careful what you wish for. Tour. Geogr. 22, 577–598. https://doi.org/10.1080/14616688.2020.1

759131
Hylleberg, S., 1986. Seasonally in Regression. Academic Press, Inc.
IATA, 2021. 2020 Worst Year in History for Air Travel Demand [WWW Document]. URL https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2021-02-03-02/ (accessed 3.13.21).
M, S.K., V, M., J, P., M, P., P, J., P, S., Benjula Anbu, B.A.M., Jothikumar, R., 2020. Social economic impact of COVID-19 outbreak in India. Int. J. Pervasive Comput. Commun. 16, 309–319. https://doi.org/10.1108/IJPCC-06-2020-0053
Ministério do Turismo do Brasil (MTUR), 2020. Anuário Estatístico De Turismo - 2020 47, 240.
OCDE, 2021. Gross domestic product (GDP) [WWW Document]. https://doi.org/10.1787/4537dc58-en
Wolrd Tourism Organization, 2021. Worst Year in Tourism History with 1 Billion Fewer International Arrivals [WWW Document]. URL https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2021-01/210128-barometer-en.pdf?GaI1QTYG.Ky9LDZ2tlDKc.iRZkinJeuH (accessed 3.13.21).

ASSESSING A DRONE BASED LAST MILE LOGISTICS SOLUTION

Bruno Lamiscarre*; Innocent E. Davidson*; Luis Gustavo Zelaya Cruz**; Felix Mora-Camino*

*Durban University of Technology
**Universidade Federal Fluminense
Corresponding Author: moracamino@hotmail.fr

PAPER ID: SIT145

ABSTRACT

In this communication a general hybrid LMD solution is considered where two types of last mile delivery vehicles are considered to operate in a coordinated way: ground vehicles and UAVs. These types of vehicles are characterized by their respective payload volume and weight capacity, by their nominal speed and by their operating costs (travel cost and energy consumption per unit of distance and load) as well by their mean speeds, loading and unloading times. In this solution, ground logistics vehicles attend off-line the planned demand while UAVs attends on-line unplanned demand. Simplified performance models are proposed to assess the proposed solution in term of cost and time response.

Keywords: last mile logistics (LMD), unmanned aerial vehicles (UAV), sustainability, fleet sizing, BHH theorem, stochastic processes.

.

1. INTRODUCTION

Global trend towards increased urbanization and the rise of e-commerce have changed the patterns of the last mile delivery (LMD) in urban areas: according to the United Nations (United Nations, 2018), 60% of people are expected to live in cities by 2030, while the volume of parcels delivered worldwide should reach 200 billion by 2025 (Pitneys Bowe, 2022). Around 86% of the parcels delivered by one of the main actors in urban logistics, Amazon, are lighter than 2.27 kg. Also, the major industrialized countries have engaged in a long-term decarbonization policy while urban logistics are an important contributor to air pollution. Thus, a new organization of urban logistics operations based on less polluting vehicles seems desirable. UAVs appear to be strong candidates to provide, at least in part, an answer to this need.

In this communication a general hybrid LMD solution is considered where two types of last mile delivery vehicles are considered to operate in a coordinated way: ground vehicles and UAVs. These types of vehicles are characterized by their respective payload volume and weight capacity, by their nominal speed and by their operating costs (travel cost and energy consumption per unit of distance and load) as well by their mean speeds, loading and unloading times. Compared to UAVs, ground logistics vehicles have two important advantages: they can transport larger or heavier loads and the scale effect makes it possible to reduce the unit cost of transport. But they contribute in an important way to urban traffic congestion and pollution, they lack flexibility and the urgent transport of individual requests by their means is extremely expensive. Then it appears that ground last mile delivery will remain of interest when it is possible to group together requests known in advance so as to promote the effect of scale, to optimize delivery routes so as to make better use of the fleet and ensure good quality of service.

2. LAST MILE DELIVERY IN URBAN AREAS

A basic Last mile delivery, also known as last mile logistics, is the transportation of goods from distribution hubs to the final delivery destination, in general the address of the customer. Until today this activity has been ground based except some minor exceptions in remote places. The goals of last mile delivery logistics are to deliver at lower cost the packages as quickly and accurately as possible. Last mile delivery is relevant for businesses that deliver products directly to their consumers. For example: direct-to-consumer retail companies, food delivery companies, third-party logistics companies, couriers, supermarkets, pharmacies, restaurants and department stores offering delivery, florists, e-commerce. In the last years e-commerce has boosted B2B (Business-to-Business) and B2C (Business-to-Consumer) last mile deliveries. Ground last mile delivery is the most expensive part of the distribution chain. It represents about 50% of shipment costs. This delivery cost increases the final cost for consumers damaging the attractiveness of this service (demand) and limits the profit margin of sellers. Many factors contribute to this increased cost:

- Lower speeds are used during the last mile delivery operation either because it is in urban areas or because local roads may be used to reach the customers.

- The last mile delivery presents large idling times related to traffic conditions (traffic lights, traffic congestion) and to the final dropping-off of packages.

- Complex routes with a large number of delivery stops may lead to extra miles since it is not easy to deliver thousands of packages to their final destination every day in an efficient way.

- Failed deliveries to final customers are frequent.

- The difficulty to select optimal routes and assign efficiently the fleet of vehicles when demands for delivery happens in real-time and is scattered randomly over the delivery space.

In the last decades last mile delivery was a booming market, but during the current pandemic it has grown even more accelerated. Important perspectives for the development of urban logistics based on the operation of UAVs

are consolidating according to recent publications (Bhawesh, Rohit Gupta & Bani-Hani, 2020), (Eun, Song, Lee & Lim, 2019), (Goodchild & Toy, 2018), since they are able to profit from the until now unused urban airspace and alleviate ground traffic by diminishing the needs for ground-based logistic transportation which is one of the main contributors to ground urban traffic congestion and pollution. Previously, many studies have been devoted to the design of efficient UAVs based urban logistics systems, see for example (Park, Kim & Suh, 2018) and (Koiwanit, 2018), where in general, traffic volumes and capacities are not taken as issues. However, other studies (Mora-Camino, Lamiscarre & Mykoniatis, 2021) expect in few decades the occurrence of high traffic densities of drones operating in the common urban airspace, making imperative and urgent its effective design and organization.

When considering the demand for products which are stored in a logistic center, it is assumed that this demand is spread stochastically over the considered urban space and during different periods of the day. Part of this demand is known beforehand due to its periodicity or its prior request, it is the *planned demand*. Another part of the demand appears online and has a stochastic nature, it is the *unplanned demand*. Planned and unplanned demands have common parameters: location for delivery, volume and weight of the package to be delivered, but the performance indexes are different. In the case of planned demand, it is supposed that delivery must be realized within a wide given time window by minimizing delivery costs, while in the case of unplanned demand, delivery must be performed as soon as possible after the issuance of the delivery request.

Considering planned demand, an extensive literature exists for solving vehicle routing problems (VRP) with the objective of minimizing logistics costs through the planning of delivery routes. In (Braekers, Ramaekers, & Van Nieuwenhuyse, 2016) a recent survey of the different variants for the VRP and the corresponding algorithms is presented. However, since here the focus is on the main variables which will influence the performance of a delivery system, no particular routing algorithm is considered and an empirical formula is used to approximate the mean distance to be travelled to serve N points uniformly distributed in a given area from an outside depot. Then given the shares of ground based and of air based LMD operations, it is possible to estimate roughly global delivery costs for the logistics company but also to estimate the environmental impact resulting from the energy used for delivery and from emissions. If different logistics companies operate the same area, the above results can be repeated and added when their demands are independent.

With respect to unplanned demand, it is supposed that each request is attended using an UAV operating in a round trip basis from a depot. It is also supposed that the travelled distances are compatible with the autonomy of the drones and that the operations of recharging and changing the batteries are carried out at the depot. Available statistics about unplanned demand can be used to size the warehouse or the local production unit of the depot which can be supplied periodically by large capacity ground vehicles. Here to treat the problems of sizing a fleet of UAVs operating from a given location and the corresponding energy consumption a stochastic model is adopted to represent demand and delivery service so that analytical results can be obtained with respect to the performance of the UAV based delivery system (service times, waiting times, energy) for a given size of the fleet of UAVs.

Finally, it is possible to compare the considered hybrid solution for LMD with a classical ground-based solution in terms of quality of service, environmental impact and energy.

3. STRATEGY FOR LMD WITH UAVS

For the urban UAVs traffic manager, ground and air, it is of importance to predict what can be the demand for using the available space, so that it is of interest to foresee the way the main users of the 3D urban space will generate traffic demand. This will allow the local authorities to design a traffic plan to structure the 3D urban space which will allow to balance potential traffic demand with societal acceptance and urban quality of life.

For instance, the last mile delivery traffic demand by a logistics company will result from its solution to different inter-related problems:

- location and dimensioning of the logistics centers,
- size and composition of the delivery fleet,
- policy for handling delivery requests,
- fleet management, scheduling and routing,

while the underlying generating process will be the final delivery demand characterized by its spatial and temporal distributions and the nature and physical parameters of the delivered packages. Depending on the considered decision problem, different representations of the logistics urban space are more suitable to contribute to its solution. The logistics urban space can be considered composed of the space in which is performed transport, the urban transport space, and the space where demand is located, the urban demand space. Of course, both spaces have the same geographical references and are closely connected. Discrete or continuous representations can be adopted to represent the urban transport space and the urban demand space. For example, 2D graph representation can be based on the grids of streets and lanes in the city through its ground circulation plan to display the transit opportunities for ground delivery vehicles, while a 3D graph representation can be adopted for a structured airspace. The period of operations can be taken either as a continuum or as a succession of discrete time periods associated with different demand and traffic patterns.

Based on discrete representations of space and time, problems such as scheduling and routing of deliveries either by ground or air, where operations costs have to be minimized while satisfying a known demand, can be tackled using an already existing vast literature in the field of Operations Research treating of the variants of the vehicle routing problem (Gan X., Y. Wang , S. Li and B. Niu, 2012). However, if scores of UAVs are considered in the delivery fleet, numerical complexity issues will arise unless the logistics urban space is divided someway in subareas. Observe that in general these approaches, complexified by time windows delivery and capacity constraints consider only by the side environmental issues.

Here it is considered that the logistics center location is already in an acceptable location and that additional areas for UAVs ground operations are available close to the warehouse at the logistic center. The location of logistic centers is in general chosen to be at the same time close to the delivery area and easily accessible by wholesale supply chains. All this means that the logistics centers associated with the last mile delivery are very often located on the outskirts of urban areas.

Two types of LMD vehicles are considered: ground vehicles and UAVs. They are characterized by their respective payload volume and weight capacity, by their nominal speed and by their operating costs (travel cost per unit of distance and remit cost) as well by their loading and unloading times.

When considering the demand for products which are stored in the logistic center, it is assumed that this demand is spread stochastically over the considered urban space and during different periods of the day. Part of this demand is known beforehand due to its periodicity or its prior request. It is referred to here as *planned demand*. Another part of the demand appears online and has a stochastic nature, it is called here, *unplanned demand*. Planned and unplanned demands have common parameters: location for delivery, volume and weight of the package to be delivered, but the performance indexes are different. In the case of planned demand, it is supposed that delivery must be realized within a wide given time window by minimizing delivery costs, while in the case of unplanned demand, delivery must be performed as soon as possible after the issuance of the delivery request.

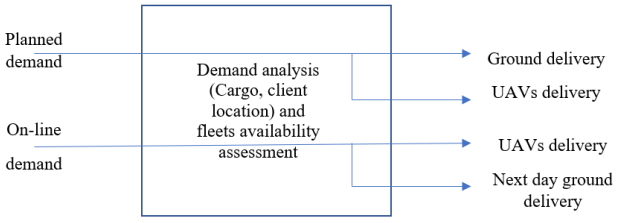


Figure 1 Principle of a cargo dispatcher system

It is assumed that parcels whose volume is greater than V_{max} or whose weight is greater than M_{max} will be delivered on the next day by ground transportation as a planned demand, while smaller or lighter parcels can be delivered either

by ground transportation or by UAVs. Observe also that smaller or lighter parcels which are part of the planned demand but are difficult to be reached by ground vehicles or whose introduction into a planned delivery route turns out to be too costly, may be added online to the unplanned request log at a time where UAVs should be available. Then, to improve the effectiveness of the LMD system, it appears of interest to have an intelligent dispatcher system that can classify online any new request in terms of planned or unplanned. Figure 1 outline this process.

4. GROUND LMD FOR PLANNED DEMAND

Extensive literature exists for solving vehicle routing problems (VRP) with the objective of minimizing logistics costs through the planning of delivery routes. For example, in (a recent survey of the different variants for the VRP and the corresponding algorithms is presented. However, since here the focus is on the main variables which will influence the performance of a delivery system, no particular algorithm is considered. With respect to planned demand, an empirical formula (Rifki, Garaix & Solnon, 2021) based on the BHH theorem (Beardwood, Halton and Hammersley, 1959) , can be used to approximate the mean distance to be travelled to serve N points uniformly distributed in a square area A (in square meters) from and outside depot positioned at a distance l of the center of the area (see Figure 2). This formula assumes that the delivery tours minimize travel distances:

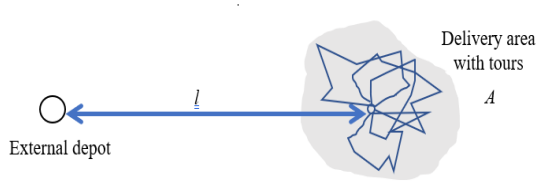


Figure 2 Organization of ground delivery for planned demand

$$L_N = 2\,l \cdot N/C + \rho \cdot N \cdot \sqrt{A}\left(\left(\frac{1}{C}\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)\right) \quad (1)$$

where ρ is a shape parameter of the distribution area and C is the capacity of the ground vehicles (equal to the maximum number of standard parcels the vehicle is able to deliver in a single tour). This formula supposes that $N \gg C$. This formula has been used to optimize the shape of delivery sub-areas in the urban space. The first distance term is relative to the connection between the depot and the urban area, the second one $(\rho \cdot N \cdot \sqrt{A}/C)$ is related with the mean distance to reach a delivery point during a tour and the third term $(\rho \cdot \sqrt{AN})$ is related with the mean distance detour needed to reach each delivery point.

Let V_O and V_I be respectively the medium speed adopted to reach from the depot the delivery area and the medium speed used during delivery. Then, the mean duration to serve N delivery points is given by:

$$d_N = 2l \cdot \frac{N}{C \cdot V_O} + \rho \cdot N \cdot \sqrt{A}\left(\left(\frac{1}{C}\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)\right)/V_I \quad (2)$$

which is an increasing function of N.

Let T be the daily operations time, then the mean number of delivery points which can be treated by a vehicle of capacity C is such that:

$$N_T = N \cdot T/d_N \quad (3)$$

or

$$N_T = \alpha(A,l,C,V_O,V_I) + \beta(A,l,C,V_O,V_I) \cdot T - \alpha(A,l,C,V_O,V_I)\sqrt{(1+\gamma \cdot T)} \quad (4.0)$$

with

$$\alpha(A,l,C,V_O,V_I) = C^2 \frac{\rho^2 A}{2\cdot\left(\rho\sqrt{A}+2l/(\frac{V_O}{V_I})\right)^2} \quad (4.1)$$

$$\beta(A,l,C,V_O,V_I) = \frac{C \cdot V_I}{\left(\rho\sqrt{A}+2l/(\frac{V_O}{V_I})\right)} \quad (4.2)$$

$$\gamma(A,l,C,V_O,V_I) = \frac{V_I}{C \cdot \rho^2 \cdot A}\left(\rho\sqrt{A} + 2l/(\frac{V_O}{V_I})\right) \quad (4.3)$$

Then the size of the fleet necessary to perform the ground delivery is given by:

$$F_G(T) = D_T/N_T \quad (5)$$

where D_T is the total considered demand during the T period. Then the number of delivery operations is approximated by:

$$D_T/C. \quad (6)$$

The estimated total distance traveled at speed V_O is given by:

$$F_G(T) \cdot 2\,l \cdot (N/C) \quad (7)$$

while the estimated total distance traveled at speed V_I is given by:

$$F_G(T) \cdot \rho \cdot N \cdot \sqrt{A}\left(\left(\frac{1}{C}\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{N}}\right)\right) \quad (8)$$

Assuming that the ground vehicles leave the depot at full load C , the total distance travelled in this condition is $F_G(T) \cdot l \cdot (N/C)$, and the same distance will be travelled when there is no load by the ground vehicles. Also it can be

considered that along a delivery tour, the vehicle is unloaded progressively.
All these elements allow not only to estimate roughly global delivery costs for the logistics company but also to estimate the environmental impact resulting from the energy used for delivery and from emissions, if any (electrical vehicles). If different logistics company operate the same area, the above results can be repeated and added when their demands are independent.

5. UAV BASED LMD FOR UNPLANNED DEMAND

With respect to unplanned demand, it is supposed that each request is attended to using an UAV operating in a round trip basis from a depot. It is also supposed that the travelled distances are compatible with the autonomy of the drones and that the operations of recharging and changing the batteries are carried out at the depot.
Available statistics about unplanned demand should be used to size the warehouse or the local production unit of the depot which can be supplied periodically by large capacity ground vehicles. Then, to diminish the time response and delivery costs for unplanned demand, this depot is assumed to be placed inside the urban area to be covered by the delivery service (see Figure 3).

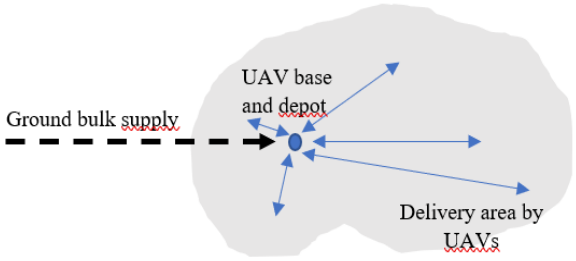


Figure . UAVs delivery for unplanned demand

The problem of the location of the UAV depot is not developed here but it must take in to account the following elements: the geographic distribution of demand, the structure of the airway network which can be used by UAVs in the urban space, the range of the considered UAVs and the available sites.
Here to treat the problem of sizing a fleet of UAVs operating from a given location a stochastic model is adopted to represent demand and delivery service so that analytical results can be obtained with respect to the performance of the UAV based delivery system for a given size of the fleet of UAVs.
It is assumed that requests for delivery are generated by a stochastic process and that once a request appears, a UAV is sent as soon as possible to the request location. It is also supposed that demand is distributed in the urban area according to another stochastic process. Here, it is considered the case in which requests for delivery follow a Poisson process of rate λ while the time to reach the request location follows an exponential distribution of parameter μ. The Poisson assumption for requests timing is a classical one and can be adopted for different periods of time where the flow of requests remains almost constant. Other stochastic models could have been adopted, however, for the sake of simplicity, the above hypothesis have been adopted, leading to analytic developments even if rather complex formulas have finally to be considered. With respect to the demand exponential distribution assumption, this can correspond to the case in which the depot is located centrally in the considered urban area. Considering a fleet of f UAVs used to treat on-line the requests, the adopted assumptions configurate a queuing system of the class $M/M/f$ with some peculiarities.
In this case, once a request has been treated, i.e. a parcel has been delivered by a UAV to a customer, this UAV will have to return to the depot to be available for the treatment of a new request. Considering that the customer starts to be served when the UAVs leaves the depot to attend him, μ can be defined as:

$$\frac{1}{\mu} = 2 \cdot \delta / V_I \qquad (9)$$

where V_I is the means speed adopted by the UAVs during their trip and where δ is the mean distance to the depot. Here the loading and unloading times of the control on the UAV are assumed to be very small compared to the duration of the journey and are not taken in to account.
If $f > \lambda/\mu$ it can be considered that the delivery process reaches a probabilistic stationary state, the waiting time to be served (in the queue) is given by [15]:

$$W_q = \pi_0 \frac{\rho\,(f \cdot \rho)^f}{\lambda \cdot (1-\rho)^2 \cdot f!} \qquad (10)$$

where ρ is the utilization level and π_0 is the probability that no client is waiting for the

assignment of an UAV to his request. They are given by:

$$\rho = \frac{\lambda}{f \cdot \mu} \quad (11)$$

and

$$\pi_0 = 1/\left(\sum_{k=0}^{f-1} \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^k}{k!} + \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^f}{f!} \frac{1}{1-(\lambda/f\mu)} \right) \quad (12)$$

The average response time for a customer to receive his parcel is given by:

$$T_U = \frac{1}{2\mu} + \pi_0 \frac{\rho\,(f \cdot \rho)^f}{\lambda \cdot (1-\rho)^2 \cdot f!}. \quad (13)$$

The probability for a client to wait more than *t* to get a parcel is given by:

$$P(W > t) = e^{-\mu t} \left(1 + \frac{\pi_0 \cdot (\frac{\lambda}{\mu})^f}{f!(1-\rho)} \cdot \frac{1 - e^{-\mu t (f-1-\lambda/\mu)}}{f-1-\lambda/\mu} \right) \quad (14)$$

These two last indexes can be used to choose the size of the fleet according to a level of service given by a value of T_U or by a value *p* such that:

$$P(W > t_{max}) < p\,, \qquad p \in]0,1[\quad (15)$$

where t_{max} is a guaranteed delivery time.
It can be also show that T_U and $P(W > t_{max})$ are decreasing functions of *f* and V_I so that ways to reduce the average response time or the probability of a timeout, is either to increase the size of the UAV fleet or to increase the flying speed of the UAVs.
The mean total distance d_U travelled at speed V_I by the UAVs during a period Δt is given by the formula:

$$d_U = 2\delta\mu \cdot \left(\sum_{n=0}^{f-1} n \cdot P_n + f \sum_{n=f}^{+\infty} P_n \right) \cdot \Delta t \quad (16)$$

where P_n, the probability of having *n* requests is given by the classical formula of *M/M/f* :

$$P_n = \begin{cases} \pi_0 \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n / n! & for\ 0 \le n < f \\ \pi_0 \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n / (f! \cdot f^{n-f} & for\ n \ge f \end{cases} \quad (17)$$

Observe that when *f* is very large, d_U tends to $2\delta \cdot \lambda \cdot \Delta t$ which corresponds to the situation in which no request is left over on the considered time period.

6. CONCLUSION

This paper has focused on the development of a methodology to design last mile logistics based on a hybrid solution composed of ground vehicle, addressed to planned demand, and on UAVs processing unplanned demand. This approach allows to join the scale effects of ground vehicles performing multiple deliveries and the flexibility and responsiveness of UAVs devoted to delivery. The ground last mile delivery routing and scheduling activities have been considered globally using an empirical formula relating minimum cost route operation in a dense urban area with the mean length necessary to serve a customer, while the UAV LMD activity has been analyzed globally using a stochastic model. In both cases, the generated traffic has been estimated and performance indexes, related with the quality of service and the environmental impact, have been produced. At this stage, it appears of interest to guarantee the effectiveness of the proposed hybrid solution, to design an intelligent dispatcher system that can classify online any new request either planned or unplanned. Finally, it is expected that, as the performances of UAVs in terms of safety, range and payload improve, they will occupy a growing LMD market share.

References

Beardwood J., J.H. Halton & J.M. Hammersley,1959, The shortest path through many points, Proc. Cambridge Phil. Soc., Vol.55, pp. 299-327.

Bhawesh S., Rohit Gupta R. & Bani-Hani D., 2020, Analysis of barriers to implement drone logistics , International Journal of Logistics Research and Applications, Volume 24, Issue 6, pp.531-550, available at: https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1782862, accessed on 04/22/2022.

Braekers K., K. Ramaekers, and I. Van Nieuwenhuyse, 2016, The vehicle routing problem: State of the art classification and review, Computers & Industrial Engineering, vol. 99, pp.300–313.

Eilon S., C.D.T. Watson-Gandy and N. Christofides,1971, Distribution Management: Mathematical Modelling and Practical Analysis, book, Hafner Editor, New York.

Eun J., Song B. D., Lee S. & Lim D. E., 2019, Mathematical Investigation on the Sustainability of UAV Logistics, Published: 25 October 2019, Sustainability — Open Access Journal , Vol.11, n°11, October.

Pitneys Bowe, 2022, The Pitney Bowes Parcel Shipping Index, available at: https://www.pitneybowes.com/us/shipping-index.html#, accessed 04/20/2022.

Gan X., Y. Wang , S. Li and B. Niu, 2012, Vehicle routing problem with time windows and simultaneous delivery and pick-up service based on MCPSO, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2012, Article ID 104279.

Goodchild, J. A. & Toy, A., 2018, "Delivery by drone: an evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO2 emissions in the delivery service industry," Transp. Res. Part D: Transp. Environ., 61 (2018), pp. 58-67.

Koiwanit J., 2018, Analysis of environmental impacts of drone delivery on an online shopping system, Advances in Climate Change Research, 9(3), pp.201-207.

Mora-Camino F., B. Lamiscarre & G. Mykoniatis, Structuring Air Logistics Networks in the Urban Space, SID2021, Valencia, May 2021.

Park, J., Kim, S., & Suh, K., 2018, A Comparative Analysis of the Environmental Benefits of Drone-Based Delivery Services in Urban and Rural Areas, Sustainability 2018, Vol.10.

Rifki O., Garaix T. & Solnon C., 2021, An asymptotic approximation of the traveling salesman problem with uniform non-overlapping time windows. CASE 2021 - IEEE 17th Inter national Conference on Automation Science and Engineering, Aug 2021, Lyon, France. pp.1-6.

United Nations, 2018, The World's Cities in 2018—Data Booklet (ST/ESA/ SER.A/417), Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

GENERATING SCENARIOS FOR AIR TRANSPORT SUSTAINABILITY

Hilda Karam*; E. Anwama *; Innocent E. Davidson*; Fabio Krikhtine**; Hamdan Alfazari***; Felix Mora-Camino****

*Durban University of Technology
**Universidade Federal do Rio de Janeiro
***Sohar University
****Ecole Nationale de l'Aviation Civile

Corresponding Author: moracamino@hotmail.fr

PAPER ID: SIT141

ABSTRACT

This study addresses the issue of the aviation sustainability for the next decades. A modelling approach considering the World air transportation sector is developed by taking into account the potential contribution of air transport to fuel consumption and to environment impacts along a timeline of several decades. It is considered that to reach audacious sustainability objectives, new aeronautical technologies must be developed while air transport operations must be permanently improved through optimization. This should result in huge needs for investment in R&D from aeronautical manufacturers and for equipment by air transport operators (airlines fleets, airport infrastructures) and questions such as what, how much and when should be answered. The proposed framework allows levels of detail (air transport services, aircraft types and technologies) compatible with strategic decision making aimed at producing the supply necessary to meet the demand in air transport services while meeting sustainability objectives. Once informed this framework will allow either the test possible coherent solution scenarios through simulation or to formulate global optimization decision making problems with respect to R&D investment in civil aeronautics, air transport operators fleet renewal and airport upgrading.

Keywords: Aviation Sustainability, Energy, Environment Impacts, Systems Analysis, Modelling, Fuzzy Sets.

1. INTRODUCTION

Sustainability for humanity can be defined as meeting our own needs without compromising the ability of future generations to meet their own needs (Purvis, Mao & Robinson, 2018). Sustainability has become an essential for the aviation sector which is a direct polluter of the Earth's atmosphere through its emissions of CO_2, NOx and other particles, noise and the creation of contrails contributing to the greenhouse effect (Ackerman, 2016), (ICAO, 2019), (EASA, 2019), (EASA, 2020). Two decades ago, with the exception of the issue of aeronautical noise, reducing environmental impact was not a top priority for the aeronautical sector. In the last decade, aircraft manufacturers and airlines have faced an increasing pressure from governments, customers, employees, and investors to act assertively on environmental issues and to promote and achieve sustainable environmental goals and targets. Face to an expected global trend of sustained growth in air transport for the coming decades, sustainability appeared as a necessity as well as a genuine and enormous business opportunity for aircraft and engine manufacturers and for service providers (airports and airlines) (Boeing, 2022), (Airbus, 2022). However, during the Covid-19 pandemic air traffic fell sharply, temporarily relieving the environmental impact of this industry while airlines revenues dropped. Today fragilized airlines are struggling with a sharp increase in the price of traditional aviation fuel and the sustainability issue become momentarily less of a priority for them.

In this study it is considered that forecasting the aviation sustainability for the next decades is a goal full of pitfalls if we consider the multitude of hazards that can arise during this period. Among the many existing uncertainties, demand for air transport services will be represented using fuzzy modelling.

A modelling approach considering the World air transportation sector is developed by taking account of the potential contribution of air transport to fuel consumption and to environment impacts along a timeline of several decades. The main actors of the air transport service supply are considered globally (aircraft manufacturers, engine manufacturers, fuel producers, airlines, airports operators and air traffic management) while a new unit is introduced to allow a coherent treatment of the energy issue. It is considered that to reach audacious sustainability objectives, new aeronautical technologies must be developed while air transport operations must be permanently improved through optimization. This should result in huge needs for investment in R&D from aeronautical manufacturers and for equipment by air transport operators (airlines fleets, airport infrastructures) and questions such as *what*, *how much* and *when* should be answered.

While remaining generic at this stage of the study, the proposed framework allows levels of detail (air transport services, aircraft types and technologies) compatible with strategic decision making aimed at producing the supply necessary to meet the demand in air transport services while meeting sustainability objectives. Once informed this framework will allow either to test possible coherent solution scenarios through simulation or to formulate global optimization decision making problems with respect to R&D investment in civil aeronautics, air transport operators fleet renewal and airport upgrading.

The main part of the paper is devoted to the description of the components of the framework including the structural assumptions with respect to the air transport sector (classification of air transport services, aircraft, technologies, fuels and impacts), an energy oriented quantification of air transport activities, fuel consumption and environment impacts, the characterization in time and money of R&D investments, the formulation of quantitative objectives for environment impacts and supply-demand constraints for air transport services along the considered timeline, finally, conclusion points out the possible utilizations of the proposed framework.

2. AIR TRANSPORT COMPOSITION, SERVICES AND EMISSIONS

Let M be the number of considered classes of air transport services developed by civil aviation, such as very-short, short, medium, long range passenger/cargo air transportation.

Let N be the number of classes of air transport vehicles which may be considered. These classes can be characterized by rotary/fixed wings, single/multiple engines,

piston/jet engines, narrow/medium/large body aircraft, and aircraft fuels. Today considering the multitude of existing aircraft designs to attend a given class of air transport services, it is assumed that M < N.

Let *L* be the number of different types of fuel/energy which can be potentially used with different aircraft types and technologies.

Each class of aerial vehicle *n* is devoted to a class *m* of air transport services, so that the set $\{1, \cdots, N\}$ can be partitioned in *M* subsets $S_1, \cdots, S_m, \cdots, S_M$.

A set I^n of aeronautical technologies (aircraft characterized by their propulsive systems, size and aerodynamics), is considered for each class of aerial vehicle $n \in \{1, \cdots, N\}$ with $I^n = I_E^n \oplus I_D^n \oplus I_N^n$ where I_E^n is the set of currently in operation technologies, I_D^n is the set of technologies already under development and I_N^n is the set of potentially new technologies which could be developed and implemented in the considered time horizon.

Let L_i^n be the set of fuels which are used by class *n* aircraft equipped with technology *i*. Here it is supposed that when different fuels are used, their mix is fixed since related with the adopted technology.

The timeline for the considered time horizon is composed of *K* years, starting at year 0.

It appears of interest to introduce a new unit to quantify air transport service with respect to energy consumption while the current units adopted in air transportations (tons or passengers per kilometer) are related with the revenue from customers.

Air transport service quantification:

Let us define here the special unit adopted in this study to quantify air transport service supply and demand when considering energy and environmental issues: tons per equivalent kilometer (TEK) measured in *tons* per *km*.

Consider an air service of class *m* performed by an aircraft of type *n* equipped with technology *i* with a maximum payload PL_i^{nm} and let for a corresponding standard flight LC_i^{nm} be the mean length of a cruise expressed in *km*, $ECD_i^{nm}(k)$ be the energy consumption (expressed in energy units) of the aircraft during take-off, climb to cruise level, descent from cruise level and landing, $ECR_i^{nm}(k)$ be the energy cruise consumption at cruise per flown kilometer for period *k*, the equivalent kilometer for this flight is given by:

$$EK_i^{nm}(k) = LC_i^{nm} \cdot (1 + ECD_i^{nm}(k)/ECR_i^{nm}(k)) \quad (1)$$

$P_i^n(k)$ be the total capacity in payload in tons per equivalent kilometer (*TEK*) of aerial vehicle of class *n* equipped with technology *i* for period *k* is then given by:

$$P_i^n(k) = NA_i^{nm}(k) \cdot NF_i^{nm} \cdot PL_i^{nm} \cdot EK_i^{nm}(\mathrm{k}) \quad (2)$$

where NF_i^{nm} is the maximum number of flights that an aircraft of type *n* equipped with technology *i* can perform in a year air transportation services of class *m* ·This number should be corrected to take into account network effects which can be assessed using current global operations statistics. Here $NA_i^{nm}(k)$is the number of available aircraft of type *n* equipped with technology *i* performing air transport service *m* during period *k*.

The capacity of the air transport sector in year *k*, *P*(*k*), is then given in *TEK* and is the sum for each class of aerial vehicle of the contributions of each current technology:

$$P(k) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{i \in I^n(k)} P_i^n(k) \qquad k \in I^n(k) \subset I^n \quad n \in \{1, \cdots, N\} \quad (3)$$

while the total *TEK* capacity of the class *n* of aerial vehicle is given by:

$$P^n(k) = \sum_{i \in I^n(k)} P_i^n(k) \quad n \in \{1, \cdots, N\} \quad (4)$$

and the total *TEK* capacity available for air transport service *m* is given by:

$$A^m(k) = \sum_{n \in S_m} P^n(k) \; m \in \{1, \cdots, M\} \quad (5)$$

Quantifying energy and environmental impacts: The environmental impact of each aeronautical technology is supposed composed of *J* different components mainly related with the type of used fuel and is relative to one *TEK*. It is assumed that continuous improvements are introduced in each aeronautical technology according to its maturity. Fuel consumption per *TEK* expressed in energy units or equivalent and

environmental emissions per *TEK* expressed in tons are given respectively by:

$$EN_i^{nl}(k - k_i^n) \quad \text{for} \quad k \geq k_i^n, \quad l \in \{1, \cdots, L\}, \quad i \in I(k), \ n \in \{1, \cdots, N\} \tag{6}$$

$$EI_i^{nj}(k - k_i^n) \quad \text{for} \quad k \geq k_i^n, \quad j \in \{1, \cdots, J\}, \quad i \in I(k), \ n \in \{1, \cdots, N\} \tag{7}$$

where $k_i^n = 0$ if $i \in I_E^n$ and is the year of introduction in operations of the new aeronautical technology $i \in I_D^n \oplus I_N^n$. The $EN_i^{nl}(k - k_i^n)$ and $EI_i^{nj}(k - k_i^n)$ are supposed to be known decreasing functions of the time. The reference cruise consumption for aircraft type *n* equipped with technology *i* during year *k* is given by:

$$ECR_i^{nm}(k) = \sum_{l \in L_i^n} EN_i^{nl}(k - k_i^n) \tag{8}$$

Accordingly, the operations costs associated to a produced *TEK* (no scale economics are considered in the present model) obeys to decreasing functions of time tending to a limit value and representing improved procedures through learning:

$$C_i^n(k - k_i^n) \quad \text{for} \quad k \geq k_i^n, \quad j \in \{1, \cdots, J\}, \quad i \in I^n(k) \tag{9}$$

This expected decreasing functions E_i^{nj} and C_i^n are the result of improved operations conditions through experimental knowledge and training. The contribution of aeronautical technology i to the consumption of fuel l and environmental impact j for class n aerial vehicle at period k are respectively given in year k by:

$$f_i^{nl}(k) = EN_i^{nl}(k - k_i^n) \cdot P_i^n(k) \quad l \in \{1, \cdots, L\}, \quad i \in I^n(k) \tag{10}$$

$$e_i^{nj}(k) = EI_i^{nj}(k - k_i^n) \cdot P_i^n(k) \quad j \in \{1, \cdots, J\}, \quad i \in I^n(k) \tag{11}$$

and the contribution of air transport service m to consumption of fuel l and environmental impact j at period k are given respectively by:

$$\varphi^{ml}(k) = \sum_{n \in S_m} \sum_{i \in I^n(k)} EN_i^{nl}(k - k_i^n) \cdot P_i^n(k) \quad l \in \{1, \cdots, L\}, \ m \in \{1, \cdots, M\} \tag{12}$$

$$\xi^{mj}(k) = \sum_{n \in S_m} \sum_{i \in I^n(k)} EI_i^{nj}(k - k_i^n) \cdot P_i^n(k) \quad j \in \{1, \cdots, J\}, \ m \in \{1, \cdots, M\} \tag{13}$$

When some selective fuel restrictions are applied to particular air transport services or globally to the whole sector, constraints such as the following must be considered:

$$\varphi^{ml}(k) \leq \varphi_{max}^{ml}(k) \quad \text{for some } l \in \{1, \cdots, L\} \text{ and some } m \in \{1, \cdots, M\} \tag{14}$$

$$\sum_{m \in \{1, \cdots, M\}} \varphi^{ml}(k) \leq \Phi_{max}^{l}(k) \quad \text{for some } m \in \{1, \cdots, M\} \tag{15}$$

where $\varphi_{max}^{ml}(k)$ is an upper limit of fuel type *l* to air transport service *m* and $\Phi_{max}^{l}(k)$ is the amount of available fuel of type *l* for the whole air transport service sector.

3. INVESTMENTS AND SUSTAINABILITY OBJECTIVES

A common development model is adopted for each technology under development (I_D^n) or to be developed (I_N^n): a minimum level of investment $IN_i^{n\,min}$ expressed in the base year 0 is necessary to develop the new technology and a minimum development delay $T_i^{n\,min}$ must be considered.
Let z_i^n be the year in which development of technology *i* has been launched (z_i^n is negative for $i \in I_D^n$) for class *n* aerial vehicle, then the following conditions must be considered:

1) $k_i^n = 0$ for $i \in I_E^n$ and $k_i^n \geq z_i^n + T_i^{n\,min}$ for $i \in I_D^n \oplus I_N^n$ (16)

2) $\sum_{k=z_i^n}^{k_i^n} \frac{IN_i^n(k)}{(1+\rho)^k} \geq IN_i^{n\,min}$ $i \in I_D^n \oplus I_N^n$ with $IN_i^n(k) = 0$ $k \geq k_i$ for $i \in I^n(k)$ (17)

where ρ is a discount rate which can be changed accordingly with different scenarios.
If technology (i, n) with $u \in I_N^n$, depends of the availability of technology (u, m) with $m \neq n, u \in I_D^m \oplus I_N^m$, it will be necessary to introduce antecedence restrictions such as:

$$z_i^n \geq k_u^m \tag{18}$$

Observe that this type of constraints allows to take into account situations where a technological improvement is profitable to different types of aerial vehicles or air transport services.

The evolution of the production potential of each technology, $i \in I^n(k)$, for each class of aerial vehicle, $n \in \{1, \cdots, N\}$, follows the equations:

$$P_i^n(k) = P_i^n(0) \quad if\ k \le k_i^n \tag{19}$$

$$P_i^n(k) = P_i^n(k-1) - R_i^n(k) + N_i^n(k) \quad if\ k > k_i^n \tag{20}$$

where $P_i^n(0)$ is the initial contribution of technology i to $R_i^n(k)$ is the *TEK* capacity of technology (i, n) removed from operation of class n during period k and $N_i^n(k)$ is the capacity of technology (i, n) put into operation during year k. The mean number of aircraft involved in these operations is:

$$RA_i^n(k) = R_i^n(k)/(NF_i^{nm} \cdot PL_i^{nm} \cdot EK_i^{nm}) \tag{21}$$

and

$$NA_i^n(k) = R_i^n(k)/(NF_i^{nm} \cdot PL_i^{nm} \cdot EK_i^{nm}) \tag{22}$$

To the fleet restructuration decisions are associated unit costs CR_i^n and CN_i^n. Unit costs CR_i^n represent the residual value of aircraft which are removed from operation. It is assumed here that CN_i^n includes not only the acquisition cost of new aircraft to perform their reference air transport service but also the costs supported by airports to allow the operation of new aircraft of type n equipped with technology i.

Over period [0, K], the total investment costs which is the sum of R&D investments and aircraft fleets renewal and airport upgrading costs, is expressed in the base year 0 by:

$$C_{Tot} = \sum_{n\in\{1,\cdots,N\}} \left(\sum_{k=0}^{K} \sum_{i\in I^n(k)} \frac{IN_i(k)}{(1+\rho)^k} + \sum_{k=1}^{K} \sum_{i\in I^n(k)} \left(\begin{pmatrix} C_i^n(k-k_i) \\ +CR_i^n \cdot RA_i^n(k) \\ +CN_i^n \cdot NA_i^n(k) \end{pmatrix} /((1+\rho)^k) \right) \right) \tag{23}$$

Here the operational revenues and costs of air carriers and airports are not considered. While this complex issue is related with the future economic conjuncture, it can be observed that historically global profit/loss margins remain small with respect to the global revenues and costs of the air transport sector.

Funds for investment are always limited and this has consequences on the choice of the technologies to be developed, on the timing of this development and on the renewal of aircraft fleets and airports up gradings. These upper limits are not clear in the sector of air transportation since they may be subject to decisions resulting from more global politics. When globally considering investments in R&D in the aeronautical sector devoted to air transportation, it appears possible to relate these levels to some percentage of the total GDP of industrialized countries, while fleet and airport investments can be related with the total flow cash of the air transportation operators (air carriers and airports).

With respect to the sustainability issue, different types of constraints can be considered:

a) When flow constraints about the environmental impacts at the end of the considered time horizon are considered, they are written such as:

$$\sum_{n=1}^{N} \sum_{i\in I^n(K)} EI_i^{nj}(K - k_i^n) \cdot P_i^n(K) \le F_{max}^j \quad j \in \{1, \cdots, J\} \tag{24}$$

where F_{max}^j $j \in \{1, \cdots, J\}$ are target upper values for each flow of them, this type of objective having been considered in different aviation forums.

b) When the objective is to limit the global pollution levels resulting from the repeated effect of the air transportation sector on the environment, the following equations can be considered:

$$L^j(k) = \left(1 - \sigma^j\right) \cdot L^j(k-1) \sum_{n\in\{1,\cdots,N\}} \sum_{i\in I^n(K)} \pi_i^{nj}(k) \quad k \in \{1, \cdots, K\},\ j \in \{1, \cdots, J\} \tag{25}$$

where $L^j(0)$ is the initial level of pollution of type j and σ^j is a natural weathering rate for component j. Then, for example, the final pollution level constraints are written as:

$$L^j(K) \le L_{max}^j \quad j \in \{1, \cdots, J\} \tag{26}$$

where L_{max}^j , $j \in \{1, \cdots, J\}$, are the target upper value for the level of each type of environmental impact. This measure of performance is difficult to be assessed considering the limited availability of reliable models and the complexity in discriminating from other sources of pollution.

c) When the objectives with respect to environmental impacts are categorized by class of air transportation services, final flow level restrictions can be written such as:

$$\sum_{n\in S_m}\sum_{i\in I^n(K)} EI_i^{nj}(K-k_i^n)\cdot P_i^n(K) \le F_{max}^{jm}$$
$$j\in\{1,\cdots,J\},\ \ m\in\{1,\cdots,M\} \qquad (27)$$

where L_{max}^{jm} , $j\in\{1,\cdots,J\}$, are the target upper values for the level of each type of environmental impact produced by air transport service m, $m\in\{1,\cdots,M\}$.

4. GLOBAL AIR TRANSPORTATION MARKET

Here, after introducing a fuzzy representation of demand along the whole time horizon, supply-demand constraints are considered for the air transport sector represented by its main services. The demand for each class of air transportation service, expressed in *TEK*, is supposed to evolve according to a possible trend to which are added uncertainties resulting from the economic and environmental dynamic situations. Although it is impossible for the demand for air transportation to get reliable estimations not only on the long run but also in the short to medium run, different scenarios can be generated. Here for each class of air transport service four close trend scenarios are considered to generate a fuzzy representation (Capitanul, Mora-Camino & Krykhtine, 2016), (Chang & Wang, 1999) of air transportation demand along the planning horizon:

$$D_{min}^m(k)\le D_-^m(k)\le D_+^m(k)\le D_{max}^m(k)$$
$$k\in\{1,\cdots,K\}, m\in\{1,\cdots,M\} \qquad (28)$$

In the case in which yearly rates are considered, these demand levels can be written for $k\in\{1,\cdots,K\}, m\in\{1,\cdots,M\}$ as:

$$D_{min}^m(k)=(1+\alpha_k^m)\cdot D_{min}^m(k-1) \ \text{ with } D_{min}^m(0)=D^m(0) \qquad (29)$$

$$D_-^m(k)=(1+\beta_k^m)\cdot D_-^m(k-1) \ \text{ with } D_-^m(0)=D^m(0) \qquad (30)$$

$$D_+^m(k)=(1+\gamma_k^m)\cdot D_+^m(k-1) \ \text{ with } D_+^m(0)=D^m(0) \qquad (31)$$

$$D_{max}^m(k)=(1+\delta_k^m)\cdot D_{max}^m(k-1) \ \text{ with } D_{max}^m(0)=D^m(0) \qquad (32)$$

where $D^m(0)$ is the current level of demand for *TPK* with class *n* aerial vehicle at the beginning of the considered time horizon. Here we have:

$$\alpha_k^m\le\beta_k^m\le\gamma_k^m\le\delta_k^m \ \text{ for } k\in\{1,\cdots,K\},$$
$$m\in\{1,\cdots,M\} \qquad (33)$$

Supply constraints

Now, adopting a fuzzy notation for each air transport demand, the capacity constraints can be written so that each class of demand m is approximatively covered:

$$\sum_{n\in S_m}P^n(k)\ge\widetilde{D}^m(k) \qquad \text{for } k\in\{1,\cdots,K\},$$
$$m\in\{1,\cdots,M\} \qquad (34)$$

The above inequalities cover for air transportation service m for period k the four differentiated situations:

$$D_{min}^m(k)\le\sum_{n\in S_m}P^n(k)<D_{mi-}^m(k) \qquad (35)$$

In that case it is accepted that the offered capacity may be slightly smaller than demand.

$$D_{-in}^m(k)\le\sum_{n\in S_m}P^n(k)<D_+^m(k) \qquad (36)$$

In that case it is considered that the offered capacity will meet demand.

$$D_+^m(k)\le\sum_{n\in S_m}P^n(k)<D_{max}^m(k) \qquad (37)$$

In that case it is considered that the offered capacity may be slightly larger than demand.

$$D_{max}^m(k)\le\sum_{n\in S_m}P^n(k) \qquad (38)$$

In that case it is considered that the offered capacity will be larger than demand.

5. CONCLUSION

In this paper a generic framework has been proposed to give support to strategic analysis and decision making with respect to the future of air transportation as a whole when considering the energy and sustainability issues. This model may be improved in many ways, for example by considering that demand for air transport services is not completely exogen and depends of its performance, by taking into account networks effects when considering the production of air transport operators, by including energy consumption of ground vehicles at airports and other air terminals. The information of such a model is a complex task involving many sources of technological, operational and economic knowledge while many uncertainties with respect to, for example, the effectiveness of prospective

technologies, should be considered. Once informed this model and once chosen the different constraints levels along the considered time horizon, the feasibility of different global strategies can be assessed while a series of mixed integer optimization problems can be formulated and solved to approach the definition of an efficient sustainable future of air transportation.

References

Airbus (2022), Environmental Responsibility- A lifecycle Approach to Environmental Impact, https://www.airbus.com/en/sustainability/environment/environmental-responsibility (2022)

Akerman J. (2005), Sustainable air transport—on track in 2050, Transportation Research Part D 10, pp. 111–126.

Boeing Company (2021), CDP Climate Change Questionnaire, July 28.

Capitanul E., Mora-Camino F.& Krykhtine F. (2016), Fuzzy Dual Dynamic Programming. *ICNC-FSKD 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Aug, Changsha, China.

ChenT. & Wang M. J. (1999), Forecasting methods using fuzzy concepts, Fuzzy Sets and Systems, n°105, pp.339-352.

EASA (2019), Aviation Environmental Impacts, https://www.easa.europa.eu/eaer/topics/aviation-environmental-impacts

EASA (2022), Sustainable Aviation-Towards Zero Emissions Aviation, https://www.easa.europa.eu/light/topics/sustainable-aviation-towards-zero-emission-aviation

ICAO (2019), Trends in Emissions that affect Climate Change, https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange_Trends.aspx

Purvis B., Mao Y. & Robinson D. (2018), Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins, Sustainability Science, Vol.14 , n°3, pp. 681–695.

A NEW INTRINSIC METRICS FOR AIR TRAFFIC COMPLEXITY

Patrice Zombré[1,2], Innocent Davidson[2], Rafael Lima de Carvalho[3] , Georges Mykoniatis[4] and F. Mora-Camino[2,4,5]

[1]ASECNA, Dakar, Senegal

[2]Durban University of Technology, Durban, South Africa

[3]Universidade Federal do Tocantins -UFT, Palmas, Brazil

[4]Ecole Nationale de l'Aviation Civile-ENAC, Toulouse, France

[5]Universidade Federal Fluminense-UFF, PGMEC, Niteroi, Brazil

Corresponding Author: moracamino@hotmail.fr

PAPER ID: SID140

ABSTRACT

In this paper is proposed a new approach for the computation of the complexity of air traffic situations by designing an intrinsic metric through the introduction of an Equivalent Spatial distance between aircraft, a Traffic Connectivity Graph and a criticality function.

Keywords: Air traffic, complexity metrics, graph theory.

1. INTRODUCTION

Along the last decades Air Traffic Management (ATM) systems are challenging a sustained increasing traffic volume and traffic complexity, that push them up to their limits. The concept of air traffic complexity has been linked to the difference between theoretical and operational capacity of a given sector, i.e. the instant maximum number of aircraft that a traffic controller is capable to handle. It has been considered that an air traffic controller (ATCO) workload, one of the main capacity limiting factors, has two dimensions:

• The human factor dimension in relation with the cognitive performances of ATCOs.

• An intrinsic complexity associated to the geometry and the density of air traffic.

Air Traffic Management (ATM) is under the perspective of undergoing major changes as results of some research programs such as the NextGen program of the Federal Aviation Administration in United States and the Single European Sky ATM Research Program of Eurocontrol (CESAR). The main goal of these programs is to develop future technologies promoting ATC automation that will efficiently help to cope more and more with traffic growth.

The concept of air traffic complexity has been introduced initially to estimate the difficulty and effort needed by ATCOs to safely manage air traffic leading to consider a large list of parameters building up the complexity. For instance in (Laudeman et al., 1998) are listed the following parameters attached to each aircraft in the considered traffic: heading changes, speed changes, altitude changes, number of other aircraft with minimum distance 0-5 nm aircraft, minimum distance 5-10 nm, number of predicted conflicts 0-25 nm, 25-40 nm and 40-70 nm at the end of a two minute sample interval. Other (Djokic et al., 2009) have established a list of complexity factors such as the number of aircraft, the number of climbing/descending aircraft, the number of aircraft with lateral distance between 0 and 25 nm and vertical separation less than 2000 ft above FL290, the variance of ground speed, a density indicator, the variability of headings and speed, the presence of divergence/convergence between pairs of aircraft and sensitivity/insensitivity indicators. The perspective of increased automation in ATC/ATM has led to new requirements. For instance, in (Prandini et al., 2012) a list of relevant requirements for a complexity air traffic metric for future ATM systems is proposed, including:

- accounting for traffic dynamics besides density,
- independency with respect to the airspace structure,
- looking ahead with respect to the time horizon,
- measuring the effort involved is safely handling air traffic,
- revealing critical encounter situations,
- providing local as well as global information about air traffic complexity,
- resulting in a sustainable computational burden.

while interest for intrinsic metrics, i.e., those which are based on geometrical properties over time of air traffic (Delahaye & Puechmorel, 2010) has grown these last years. Some intrinsic metrics have already been proposed in the literature, but such solutions can present limitations concerning expected properties such as continuity, additivity and scalability. In this study we propose a new metric based on graph theory to circumvent these possible limitations.

2. BACKGROUND

Adopted assumptions

Here mainly en-route traffic is considered over a large area of traffic independently of possibly pre-existing traffic sectors. The space considered can be either the coverage of the screen of an air traffic control position (digitalized radar screen) or a much larger area covering different traffic sectors of adjacent national airspaces. Let $AC(k)$ be the set of aircraft present in this airspace at instant k.

The estimated position and speed of each aircraft at current time as well as its predicted trajectory for the next T period of time, where T is the ATC tactical planning horizon, are supposed available. This predicted

trajectory is in general produced by the navigation function of an on-board FMS.

A time step ΔT measured in seconds, is considered which is greater that the reaction time of a pilot but much smaller that the Traffic Advisory and Traffic Resolution delays of modern TCAS (Traffic Conflict Avoidance System). So, the time tick is such as $t_{k+1} = t_k + \Delta T$.

Subsonic lower and upper speed reference values, V_{min} and V_{max}, are adopted for the considered airspace, for example respectively 250 kt and 500 kt. N_T type of aircraft with respect to climb/descent/cruise speed performances are considered and typical climb/descent rates CL_s/DS_s , $s = 1, \ldots, N_T$, expressed in feet per minute are considered.

Let $lg_A(k)$, $lt_A(k)$, $h_A(k)$ be respectively the longitude, latitude and flight altitude level of aircraft *A*. Taking an Earth centric Cartesian reference frame, the corresponding coordinates $x_A(k)$, $y_A(k)$, $z_A(k)$ expressed in meters can be computed. When at time *k* the updated planned trajectories of the aircraft are available between time *k* and time *k+T* where *T* is the tactical planning horizon, it will be possible to compute for each aircraft the trajectory during this time horizon:

$$x_a(h), y_a(h), z_a(h) \quad a \in AC(h)\ k \le h \le k + T \qquad (1)$$

The current speed of these aircraft are given in the same reference frame by:

$$\dot{x}_a(k), \dot{y}_a(k), \dot{z}_a(k) \quad a \in AC(k) \qquad (2)$$

Equivalent spatial distance between two aircraft

At a given time *k*, an aircraft is either level, climbing or descending. The distance between two aircraft flying at the same level is quite clear and an Euclidian distance can be used. However, the distance between two aircraft flying at different flight levels and altitudes and performing or not vertical maneuvers is a more complex issue. It appears that the difference in time scale when comparing vertical and longitudinal maneuvers of aircraft should be taken into consideration specially when considering that time margin before encounter is a fundamental issue in the perspective of air traffic control. Considering the different configurations of flight (level, climb, descent) and types of involved aircraft, up to eighteen different traffic situations can be considered.

Here an equivalent vertical distance between two aircraft is introduced to cope with the above consideration. For that, let be two aircraft at time *k*, aircraft *A* of type s_A flying at altitude $z_A(k)$and aircraft *B* of type s_B flying at altitude $z_B(k)$ with $z_A(k) > z_B(k)$. A lower time duration for these aircraft reaching the same altitude is given by:

$$T_{AB}^{min}(k) = \frac{z_A(k) - z_B(k)}{DS_{s_A} + CL_{s_B}} \qquad (3)$$

This lower bound does not take into account the time lags to eventually initiate the climb or descent maneuvers. So, the above formula can be corrected according to the flight configurations and performances of the two aircraft. For example, if at time *k* aircraft *A* is level flight and aircraft *B* is already climbing (Figure 1), formula (3) may be corrected to (4c):

$$\alpha = CL_B^0 \cdot d_{s_B}^{ChCl} \qquad (4a)$$

$$\beta = \left(d_{s_A}^{StDs} - d_{s_B}^{ChCl}\right) \cdot CL_{s_B} \qquad (4b)$$

$$T_{AB}^{min}(k) = \frac{z_A(k) - z_B(k) - \alpha - \beta}{DS_{s_A} + CL_{s_B}} \qquad (4c)$$

where $CL_B^0$is the initial climb rate of aircraft *B*, $d_{s_B}^{ChCl}$ is the time delay to change the rate of climbing for aircraft type s_B and $d_{s_A}^{StDs}$is the time delay for aircraft type s_A to start a descent maneuver. Here it is supposed that $d_{s_B}^{ChCl}$is smaller than $d_{s_A}^{StDs}$, otherwise the formula can be modified accordingly.

The time related equivalent vertical distance between aircraft *A* and *B* is here defined by (5):

$$\Delta z_{AB}(k) = T_{AB}^{min}(k) \cdot V_{min} \qquad (5^*)$$

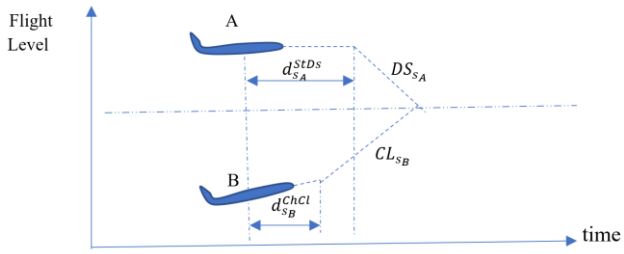


Figure 1 Minimum delay to common level rejoinder.

Finally, the equivalent spatial (*ES*) distance between the two aircraft is given in meters by the semi Euclidian distance (5c):

$$\Delta^2_{x(k)} = (x_A(k) - x_B(k))^2 \quad (5a)$$

$$\Delta^2_{y(k)} = (y_A(k) - y_B(k))^2 \quad (5b)$$

$$D_{AB}(k) = \sqrt{\Delta^2_{x(k)} + \Delta^2_{y(k)} + \Delta z_{AB}(k)^2} \quad (5c)$$

Note the in relation (*) we had to choose arbitrarily a lower limit for the speed to get a lower value of the altitude difference to keep safer. Another approach of interest could be to consider instead of a spatial distance between two aircraft, their temporal distance defined as the minimum time to get either an encounter between them or to reach a declared conflict distance between them.

3. TRAFFIC CONNECTIVITY GRAPH (TCG)

Construction and analysis

At time *k*, a traffic connectivity graph given by $G(k) = [V(k), E(k)]$ where $V(k)$ is the set of vertices and $E(k)$ is the set of edges between these vertices. The vertices, $v \in V(k)$, are associated to the aircraft present at that time in the studied airspace. Let a threshold *ES* distance $D_{max}^{S_A S_B}$ be a maximum *ES* distance so that two aircraft *A* and *B* can be considered connected. The value of this distance depends of the type of involved aircraft and is set according to the necessity by the ATC system to anticipate their relative movement when dealing with air traffic at a given time. There is an edge $(A, B) \in E(k)$ between the two vertices associated to aircraft *A* and *B* when their ES distance is shorter than $D_{max}^{S_A S_B}$ which is a distance threshold:

$$D_{AB}(k) \leq D_{max}^{S_A S_B} \quad (6)$$

To avoid abrupt appearance or disappearance of an edge when distance evolves around D_{max}, the above constraint can be replaced by a fuzzy constraint (Ross, 2010). Then to each pair of aircraft A and B can be attached a membership degree $\mu_{AB}(k)$ as represented in Figure 2 where $D_{max}^{S_A S_B -}$ and $D_{max}^{S_A S_B +}$ are the lower and supper limits of the transition distance between considering or not the interaction between aircraft.

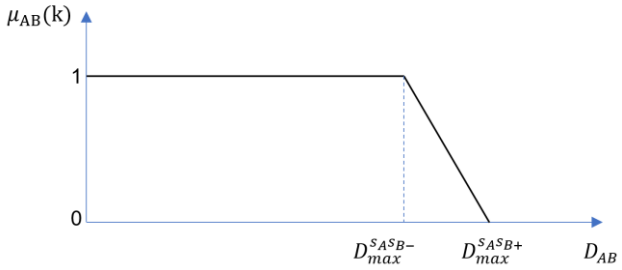


Figure 2 Membership degree attached to a pair of aircraft.

In the following only pairs of aircraft and associated edges of the TCG such as $\mu_{AB}(k) > 0$ will be considered. The resulting graph may be either connected or composed of different connected components.

When some aircraft are considered in interaction as defined above, to avoid creating new conflicts by solving some others, ATC has to consider globally this subset of aircraft. This leads to distinguish in the TCG not only its connected components but within them their building cliques. Then it appears of interest to build the minimum clique cover of this graph where each clique is associated to a traffic bundle. To each clique can be attached a membership degree which is the product of the membership degrees of its connections.

In graph theory algorithms are available to build the connected components of a graph (Tremaux's algorithm of polynomial complexity). Algorithms to perform the

partition of a graph in a minimum number of cliques are NP-hard but returning to the cartesian coordinates of the position of the aircraft it is easy to design an algorithm of polynomial complexity to build this partition.

Then the TCG at instant k, $G(k)$, is characterized by $N_{co}(k)$ connectivity components and by for each connectivity component, j= 1 to $N_{co}(k)$, by the number of maximum cliques partitioning this connectivity components N_{clj}. Let $N_{vj}^{m}(k)$ be the number of vertices in the m^{th} clique. Figure 3 represents this three levels decomposition of the TCG. Then it is also possible to associate to each vertex (aircraft) a, the set C_a of maximum cliques (traffic bundles) to which it belongs.

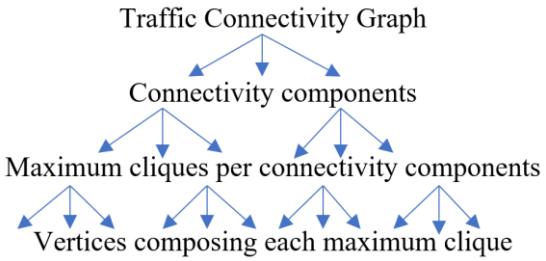


Figure 3 Hierarchical view of the Traffic Connectivity Graph.

Observe that to an isolated aircraft corresponds a connectivity component and a maximum clique composed of itself, maximum cliques may be composed of only two vertices and a vertex may belongs to different maximum cliques, that means that an aircraft may interact with more than one bundle of aircraft.

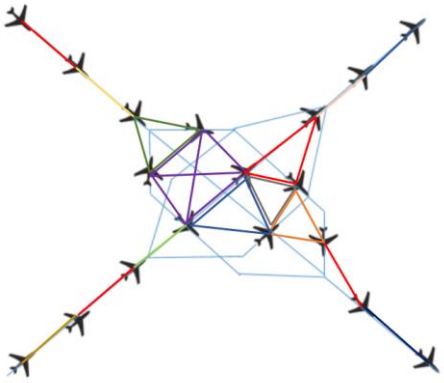


Figure 4 Example of TCG with maximum clique decomposition.

In Figure 4, an example of air traffic configuration from (Isufaj et al., 2021) is used to illustrate the maximum clique decomposition of the TCG where aircraft connected by the same colour link belong to a same maximum clique.

Edge complexity of graphs and air traffic complexity

A basic measure used in graph complexity theory (Even & Even, 2012) is the number of edges. Here we will consider the edges with their associated membership degree. Let $e_G(k)$ be this number in $G(k)$, defined as in (7):

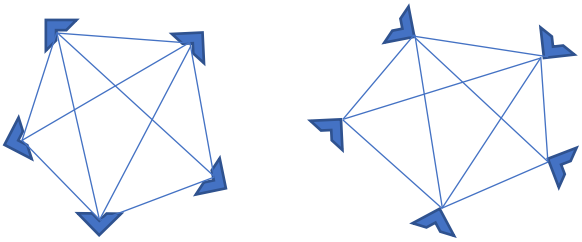
$$e_G(k) = \sum_{i,j \in V(k), i \neq j} \mu_{ij}(k) \tag{7}$$

This number is such that:

$$0 \leq e_G(k) \leq C^2_{|V(k)|} = |V(k)| \cdot (|V(k)| - 1)/2$$

When $e_G(k) = 0$, there is no need for ATC to take into account any interaction between the aircraft. This situation may happen when the considered airspace is large and presents a low density of aircraft. In that case the complexity of traffic is low but not zero because the ATC has to follow-up all these aircraft. When $e_G(k) = C^2_{V(k)}$, ATC assess the traffic situation by considering the interaction of all aircraft between them. This situation may happen when the considered airspace is quite reduced and presents a high density of aircraft. However, this does not mean that ATC has necessarily to take complex decisions.

Figure 5a and Figure 5b represent two situations where $e_G(k) = C^2_{V(k)}$. In Figure 5a there is no perspective of conflict between the aircraft although they are close to each other while in Figure 5b, imminence of a global conflict will force ATC to redirect traffic.



(a) (b)

Figure 5 (a) Diverging bundle and (b) Converging bundle.

So, it appears that proximity is not sufficient to characterize complexity and other ingredients should be introduced in the complexity assessment of a traffic situation. A complexity metrics should be an increasing function of the number of aircraft (awareness of each aircraft by ATC), of the number of interactions between aircraft (awareness of proximity between aircraft by ATC), of the intensity of the interactions and of the perspective or imminence of conflicts (awareness of conflicts by ATC).

4. THE PROPOSED COMPLEXITY METRICS

Criticality of separation between two aircraft

Here is introduced a new function H(x) defined over $\mathbf{R}^{+}$-{0} from a truncated logarithm function as:

$$H(x) = -\lambda \cdot ln\, x \qquad if\ \ 0 < x \leq 1 \qquad (8a)$$

$$H(x) = 0 \qquad if\ x > 1 \qquad (8b)$$

where λ is a positive parameter.

A threshold distance $D_c^{s_i s_j}$ below which it is considered that *i j* aircraft separation is under danger and demand an increased attention from ATC, is introduced as well as a reduced variable δ_{ij} such as:

$$\delta_{ij} = D_{ij}(k)/D_c^{s_i s_j} \qquad (9)$$

where $D_{ij}(k)$ is the ES distance between aircraft *i* and *j* at instant k. It is expected, considering the definition of $D_{max}^{s_i s_j}$ that it is larger than or equal to $D_c^{s_i s_j}$.

Here it is assumed that the criticality level of the current separation between aircraft *i* and *j* is given by:

$$Cr_{ij} = H(\delta_{ij}) \qquad (10)$$

Then, if at instant *k* aircraft *i* and *j* are associated with the vertex of a common maximum clique in *G(k)*:

$$Cr_{ij}(k) = -\lambda \cdot ln\ (\delta_{ij}(k)) \qquad (11)$$

with $Cr_{ij}(k) = 0$ when $\delta_{ij}(k) = 1$ if they do not belong to some common maximum clique then $Cr_{ij}(k) = 0$. To fix the value of the parameter λ, *let* $D_{min}^{s_i s_j} < D_c^{s_i s_j}$ be the distance at which a conflict between two aircraft *i* and *j* is definitely declared and ATC needs to interfere. Assuming that the criticality level is equal to d_c in this situation. Then:

$$\lambda = d_c / ln(\frac{D_c^{s_i s_j}}{D_{min}^{s_i s_j}}) \qquad (12)$$

Assuming that the ratio $\frac{D_c^{s_i s_j}}{D_{min}^{s_i s_j}}$ is constant for any pair of aircraft types and equal to ρ with ρ > 1, then $\lambda = d_c / ln(\rho)$.

Figure 6 gives a view of function *H(x)*.

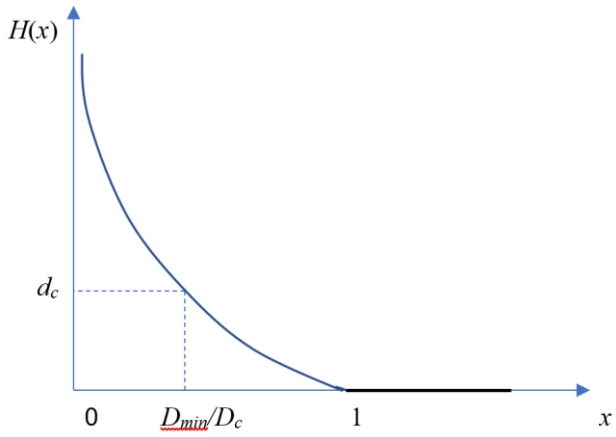


Figure 6 Graphical representation of function H(x).

Here, since when $\delta_{ij}(k) = 0$, there is a collision and when $\delta_{ij}(k) = 1$ there is no potential collision between aircraft *i* and *j*, this reduced distance can be seen as an a priori probability of no conflict between these two aircraft for ATC, the a posteriori probability taking into account the speed vectors of these two aircraft.

Looking ahead for the criticality of an interaction between two aircraft *i* and *j* from the same clique, a one-step prediction can be computed for their criticality:

$$Cr_{ij}(k+1) = -\lambda \cdot ln\ (\delta_{ij}(k+1)) \approx -\lambda \cdot ln\ (\delta_{ij}(k) + \dot{\delta}_{ij}(k) \cdot \Delta T) \qquad (13)$$

when $\frac{\dot{\delta}_{ij}(k)}{\delta_{ij}(k)} \cdot \Delta T \ll 1$, we get:

$$Cr_{ii}(k+1) \approx -\lambda \cdot ln\left(\delta_{\mathrm{ij}}(k)\left(1+\frac{\dot{\delta}_{\mathrm{ij}}(k)}{\delta_{\mathrm{ij}}(k)}\cdot \Delta T\right)\right) \approx Cr_{ij}(k) - \lambda \cdot \frac{\dot{\delta}_{\mathrm{ij}}(k)}{\delta_{\mathrm{ij}}(k)} \cdot \Delta T \quad (14)$$

Since:

$$\frac{\dot{\delta}_{ij}(k)}{\delta_{ij}(k)} = \frac{\dot{D}_{ij}(k)}{D_{ij}(k)} \quad (15)$$

this ratio is independent of D_c.

For example, with $\dot{\mathrm{D}}_{\mathrm{ij(k)}} = 250$ kt, $D_{ij}(k) = 20$ nm, $\Delta T = 20$s, $\frac{\dot{\delta}_{\mathrm{ij}}(\mathrm{k})}{\delta_{\mathrm{ij}}(\mathrm{k})} \cdot \Delta T = 0.065$ and the first order logarithm approximation generates a 3% error. Then, in many cases, the quantity $-\lambda \cdot \frac{\dot{\delta}_{ij}(k)}{\delta_{ij}(k)}$ is a first order approximation of the derivative with respect to time of the criticality of pair *i*-*j*.

The derivative $\dot{\delta}_{ij}(k)$ can be computed directly from the current speed vectors of aircraft *i* and *j*. For example, if $z_i(k) > z_j(k)$:

$$\dot{\delta}_{ij}(k) = \Big(\big(x_i(k) - x_j(k)\big)\cdot\big(\dot{x}_i(k) - \dot{x}_j(k)\big) + \big(y_i(k) - y_j(k)\big) \cdot \big(\dot{y}_i(k) - \dot{y}_j(k)\big) + \Delta z_{ij}(k) \cdot \Big(\big(\dot{z}_i(k) - \dot{z}_j(k)\big)/(DS_{s_i} + CL_{s_j})\Big)\Big)/\delta_{ij}(k) \quad (16)$$

The proposed complexity metrics

The complexity assigned to a pair of aircraft in interaction is defined here as:

$$C_{ij}(\mathrm{k}) = \mu_{ij}(k)(1 + Cr_{ij}(\delta_{\mathrm{ij}}(k) + \dot{\delta}_{\mathrm{ij}}(k)\Delta T)) \quad (17)$$

The first term is relative to the awareness by ATC of the interaction between aircraft *i* and *j*. If no criticality between these two aircraft is currently present or is expected in the next time period ΔT, complexity will remain equal or inferior to unity. Otherwise, complexity will increase with the present or expected reduced distance between these aircraft.

If the tendency of distance is to increase, this complexity will decrease and when their distance becomes superior to $D_c^{s_i s_j}$, the complexity will become equal to unity. If the reduced distance $\delta_{ij}(k)$ increases beyond $D_{max}^{s_i s_{j-}}/D_c^{s_i s_j}$, complexity decreases and goes to zero when $\delta_{ij}(k) \geq D_{max}^{s_i s_{j+}}/D_c^{s_i s_j}$. This function is represented in Figure 5.

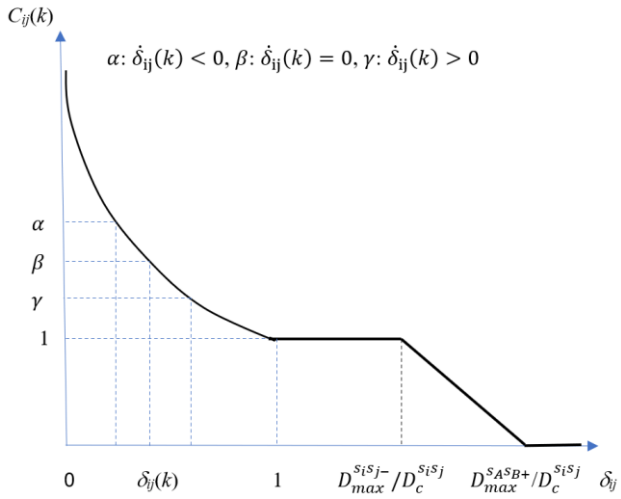


Figure 7 Graphical representation of function $H(\delta_{ij})$.

Here:

$$\alpha - \beta \approx \beta - \gamma \approx -\lambda \cdot \frac{\dot{\delta}_{ij}(k)}{\delta_{ij}(k)} \cdot \Delta T \quad (18)$$

The complexity of traffic around aircraft i is then given by:

$$C_i(k) = \sum_{j:D_{ij}(k)/D_c^{s_i s_j} \leq 1} C_{ij}(k) \quad (19)$$

Observe that the set of vertices $\left\{j: D_{ij}^{s_i s_j}(k) \leq D_c^{s_i s_j}\right\}$ is the union of the vertices of the cliques to which vertex *i* belongs. This allows to construct a dynamic map of complexity by assigning to each aircraft present in the considered airspace its complexity index at each instant.

Here considering the TCG at instant *k*, the complexity associated to a clique *c* corresponding to N_c aircraft in interaction is

given by the addition of the complexity levels of its edge components:

$$CC_c(k) = = \sum_{(i,j)\in \text{Clique } c, i\neq j} \mu_{ij}(k) C_{N_c}^2 - \left(\frac{\lambda}{2}\right) \cdot \sum_{(i,j)\in Clique\ c, i\neq j} ln\left(\delta_{ij}(k) + \dot{\delta}_{ij}(k) \cdot \Delta T\right) \quad (20)$$

The complexity associated to a connected component *cc* of the TCG at instant k is given by the addition of the complexity level attached to each edge of the connected component:

$$CCC_{cc}(k) = \sum_{(i,j)\in cc} C_{ij}(k) \quad (21)$$

Finally, a complexity index associated to the whole traffic at instant *k* is given by:

$$CT(k) = \max_{cc} CCC_{cc}(k) \quad (22)$$

Here the max operator is used since the whole air traffic control situation is split at a given instant into separate independent problems, the more complex giving the overall complexity assessment.

5. CONCLUSION

In this study we have proposed a new intrinsic metric based on graph theory for air traffic complexity starting from different theoretical considerations than those of existing approaches.

A procedure is created to dynamically generate, from flight plans and current positions of given traffic, connectivity graphs between evolving aircraft. The proposed metric can be used locally or more globally, can be applied to assess the complexity of traffic around a given aircraft or within a given bundle of aircraft. This should allow to answer questions, such as «what is the intrinsic complexity of current air traffic configuration? » or, « what is the robustness/elasticity of a traffic situation? » or, « what is the criticality of a traffic situation? » through the development of new interface with the ATCO.

References

Delahaye, D., & Puechmorel, S. (2010). Air traffic complexity based on dynamical systems. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, pp 2069-2074. https://doi.org/10.1109/CDC.2010.5718004

Djokic, J., Fricke, H., Schultz, M., & Thiel, C. (2009). Air traffic Complexity as a Safety Performance Indicator. *Science & Military Journal*, *4*(2), 20. https://www.researchgate.net/profile/Michael-Schultz-20/publication/322071643_Air_traffic_complexity_as_a_safety_performance_indicator/links/5a42b38e0f7e9ba868a481a4/Air-traffic-complexity-as-a-safety-performance-indicator.pdf

Even, S., & Even, G. (2012). *Graph Algorithms, Second Edition*. Cambridge University Press. http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/computer-science/algorithmics-complexity-computer-algebra-and-computational-g/graph-algorithms-2nd-edition

Isufaj, R., Koca, T., Piera, M. A., Schultz, M., & Rosenow, J. (2021). Spatiotemporal graph indicators for air traffic complexity analysis. *Mdpi.Com*. https://doi.org/10.3390/aerospace8120364

Laudeman, I. V., Shelden, S. G., Branstrom, R., Brasil, C. L., Shelden, S. G., Branstrom, R., & Brasil, C. L. (1998). *Dynamic Density: An Air Traffic Management Metric*.

Prandini, M., Putta, V., & Hu, J. (2012). Air traffic complexity in future Air Traffic Management systems. *Journal of Aerospace Operations*, *1*(3), 281–299. https://doi.org/10.3233/aop-2012-0015

Ross, T. J. (2010). Fuzzy Logic with Engineering Applications: Third Edition. *Fuzzy Logic with Engineering Applications: Third Edition*. https://doi.org/10.1002/9781119994374

CARACTERIZAÇÃO DO ACÚMULO DE BORRACHA POR MEIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E POR ANÁLISE DAS OPERAÇÕES DE POUSOS E DECOLAGENS

Tiago Silveira de Andrade Aquino, Francisco Heber Lacerda de Oliveira, Gustavo Mota
Universidade Federal do Ceará,

*** Corresponding author e-mail address**: tiago.silveira@det.ufc.br, heber@det.ufc.br, gustavomota953@alu.ufc.br

PAPER ID: SIT158

ABSTRACT

O acúmulo de borracha causado por pneus de aeronaves nas pistas de aeródromos, sobretudo durante as operações de pouso e decolagens, representa um risco à segurança por favorecer a ocorrência de acidentes. Entre as causas está o comprometimento do escoamento de água na pista, pela obstrução da textura superficial do revestimento, prejudicando o seu coeficiente de atrito. A condição é mitigada pela remoção periódica da borracha da pista, cujo acúmulo está relacionado ao volume de operações e fatores condicionantes, como umidade ambiental e temperatura da pista. O presente artigo tem como objetivo relacionar o acúmulo de borracha de um aeródromo com o volume de operações de pousos e decolagens. A caracterização da área de acúmulo de borracha ocorreu por meio de processamento de imagens, obtidas por veículo aéreo não tripulado. O estudo considerou o volume de operações de aeronaves com propulsão de motor a reação, como a condição crítica de operação. Identificando a ocorrência de um serviço de remoção de borracha e comparando diversas condições de processamento foi possível identificar graficamente que a variação do percentual de área emborrachada era compatível com o volume de operações de pouso.

Keywords: segurança operacional, pavimento, aeroporto, processamento de imagens, atrito.

1. INTRODUÇÃO

As pistas de pousos e decolagens (PPD) são pavimentos que exigem cuidadosa manutenção e monitoramento para manter a segurança das operações. Dentre as ocorrências que deterioram a segurança das PPD em aeródromos está o acúmulo de borracha.

O monitoramento do acúmulo de borracha é realizado por meio da medição do coeficiente de atrito do pavimento, cujas normas de controle, equipamentos utilizados e frequência de monitoramento estão especificados em ANAC (2020, 2021).

A instrução normativa nacional é baseada em normativas internacionais (FAA, 1997; ICAO, 2002) e descreve os mesmos critérios de monitoramento, avaliação e intervenções.

Uma forma de parametrizar o acúmulo, percebido também a olho nu, caracterizado por uma mancha mais escura que a do pavimento da PPD, é por meio de imagens aéreas. A partir dessas imagens, é possível aplicar algoritmos de processamento de imagens (PDI) para estimar a quantidade do acúmulo pela área da zona emborrachada, baseada nas tonalidades das manchas.

O acúmulo de borracha origina-se do processo de polimerização dos pneus das aeronaves, provocado pelo calor gerado no atrito entre a superfície da pista e os pneus das aeronaves (COTTER; SMITH, 2006). Essa película de resíduo emborrachado, com características similares ao de uma lâmina de vidro sobre a textura do pavimento na PPD, reduz o coeficiente de atrito da pista e contribui para o risco de acidentes em condições de pista molhada (MCKEEN; LENKE, 1984).

Diferentes fatores podem contribuir para uma maior soltura de borracha e, consequentemente, acúmulo na PPD. Dentre eles, pode-se listar questões meteorológicas, como a temperatura, e características das aeronaves como o peso.

A execução do serviço de remoção de borracha requer fechamento temporário de pista, uso de equipamentos e materiais onerosos (YOUNG; WELLS, 2014), e que inclusive podem remover material do revestimento e danificar a rugosidade do pavimento (WATERS, 2005)e perda de material. Preocupações com gerenciamento de riscos e recursos motivaram Abduljabbar *et al.* (2020) a desenvolverem um sistema para tomada de decisão de método de remoção de borracha baseado nestes critérios. Entende-se então que um monitoramento mais preciso das condições de pista permitiria um melhor gerenciamento dos recursos e programação da realização das operações de remoção de acordo com as operações de pouso e decolagem.

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) e suas imagens vem sendo utilizados em pesquisas e procedimentos de apoio à estruturas aeroportuárias (AKBAR *et al.*, 2019; GRADOLEWSKI *et al.*, 2021; PARKER *et al.*, 2022).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é determinar uma taxa de acúmulo de borracha na pista por meio de correlações entre a variação da mancha do emborrachamento, obtidas por PDI, e as operações de pouso e decolagem na PPD estudada. Além disso, identificar propriedades nas imagens que contribuem para uma melhor caracterização do emborrachamento da pista em análise.

2. METODOLOGIA

As imagens foram coletadas a partir de voo de VANT conduzido por um operador de aeródromo em três meses distintos. As datas exatas das coletas são de 17/10/2021, 04/12/2021 e 26/02/2022 respectivamente. O aeródromo escolhido está situado na Região Sul do Brasil.

Para proporcionar imagens de alta resolução e maior riqueza de detalhes, o VANT sobrevoou a uma altitude mais baixa, contudo, que não permite a captura da pista inteira. Porém, um conjunto de imagens foi criado para cada mês, e a partir disso foi gerado um mosaico que representa a pista inteira como a criação de um panorama. Por esse motivo, o voo do VANT ocorreu ao longo de três viagens de uma cabeceira a outra para aumentar o número de imagens e as sobreposições entre elas. Contribuindo dessa forma para a geração do mosaico daquela coleta e em uma alta resolução e com o mínimo de artefatos ou defeitos.

Foi utilizado o modelo de VANT DJI Mavic Air 2, conduzido pelo operador ao longo do eixo da pista de uma cabeceira à outra. A altura média foi de 70 metros em outubro e 30 metros nos dois meses restantes e as capturas possem resolução geral de 4000x3000 *pixels*. O presente trabalho agrupou as imagens, de cada mês de coleta, dentre as que compreendem a primeira e a segunda cabeceira da pista, denominadas aqui de cabeceira 11 e 29, respectivamente. Assim, para cada coleta, foram gerados dois mosaicos. O *software* utilizado foi o Bentley Contextcapture v19.1. Devido às diferenças quanto ao volume de imagens de cada conjunto, de cada cabeceira, apesar de que as capturas individuais tenham uma alta resolução comum, os mosaicos podem se diferenciar na quantidade de *pixels*. A Figura 1 apresenta os mosaicos por cabeceira em cada mês e a resolução em *pixels*.

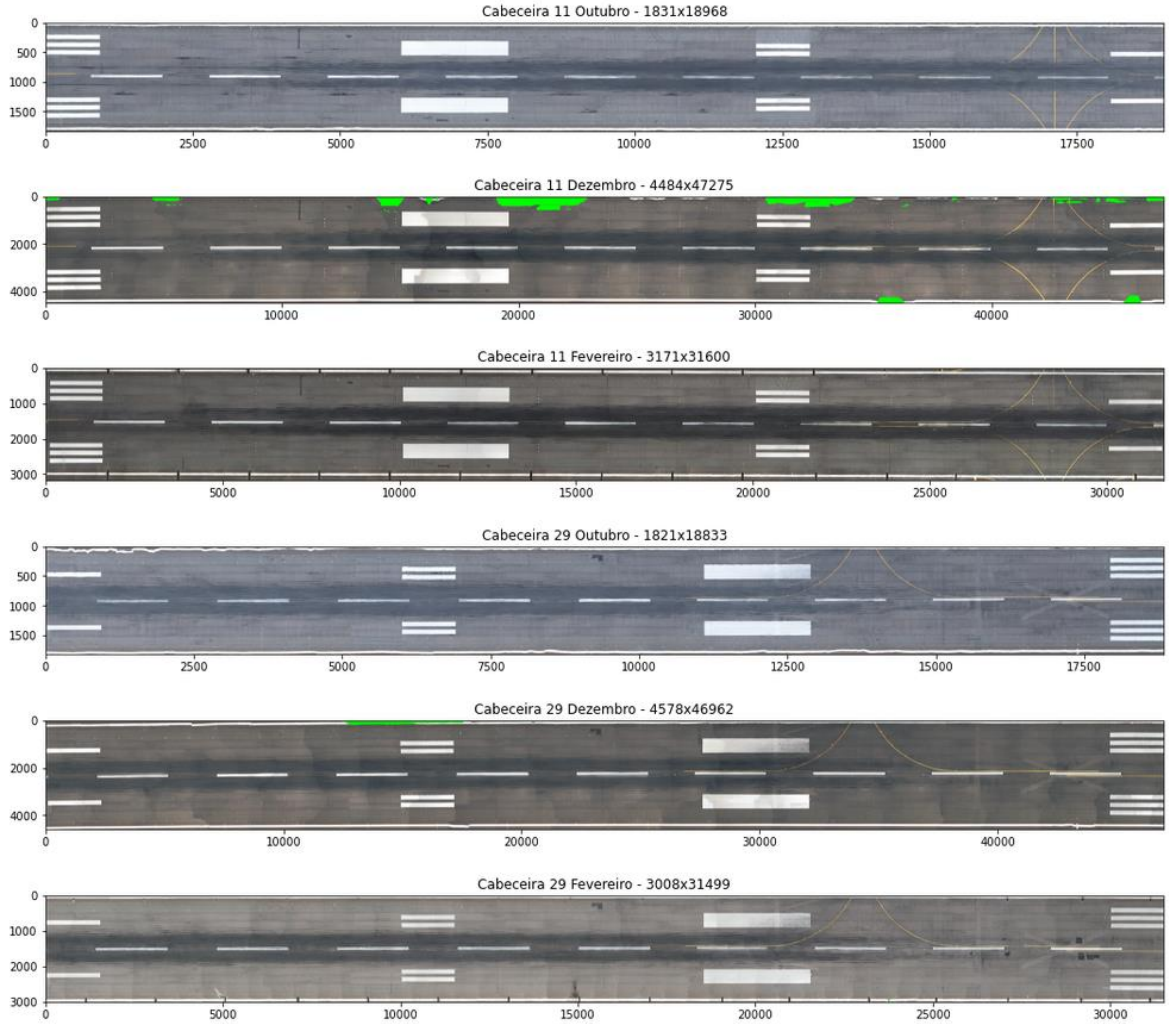


Figura 1: Mosaicos gerados, por período, cabeceira, e com a respectiva resolução

A aplicação de PDI se dividiu em três etapas: (i) cálculo de segmentação para mensurar o acúmulo de borracha no pavimento; (ii) reaplicação da técnica após realizar a calibragem das imagens por meio do método elaborado; e (iii) análise dos resultados com comparativo com os demais dados de operações de pousos e decolagens, entre outros. Os mosaicos foram ainda cortados de modo a representar, proporcionalmente, cerca de 19 m aproximados de largura total de pista centralizado no eixo.

O cálculo de segmentação ocorreu pela aplicação de um método de extração da área emborrachada na pista. Na imagem, são identificados os *pixels*, baseados em suas tonalidades, que correspondem à região de interesse (*region of interest*, ROI) que no caso é a área emborrachada.

O método escolhido é o método de Yen (YEN *et al.*, 1995). Após extrair a área emborrachada, a estimativa se dá pelo cálculo do percentual dessa área com relação à pista toda com base na quantidade de *pixels*. Esse

percentual é proporcional ao da área emborrachada real no pavimento.

A realização da calibragem nas imagens ocorreu pela escolha de uma imagem chamada neste trabalho de *calibrante*. Uma imagem *calibrante* é aquela imagem que terá suas características usadas como parâmetro para que as imagens que serão calibradas incorporem suas características de tonalidade. Neste caso, as tonalidades gerais do espectro de cores RGB. O objetivo é, por meio da imagem exemplar, calibrar as demais para que suas características fiquem mais homogêneas e, por consequência, sejam melhoradas. Além disso, o ganho é de que os parâmetros para aplicação da segmentação podem tornar-se mais similares devido a semelhança final entre as imagens após a calibragem. Assim, não havendo esforços para encontrar parâmetros completamente diferentes para as imagens tão diferenciadas.

A partir da seleção da imagem exemplar, seleciona-se um pixel branco e se obtém as suas intensidades. A partir disso, escolhe-se outros pixels brancos, um para cada imagem a ser calibrada. As diferenças entre as intensidades serão utilizadas para criar uma variável a ser utilizada em uma função que visa minimizar essa diferença. Foi desenvolvido um algoritmo capaz de exibir na tela a imagem *calibrante* a fim de se selecionar um pixel de uma região pré-definida da pista, por meio de um clique de mouse, e na sequência o mesmo procedimento na mesma região da pista para as demais imagens a serem calibradas. Assim, automatizando a execução e tornando seu uso mais intuitivo.

O método de calibragem foi desenvolvido baseado em Thanh *et al.* (2020). O método originalmente considera o mapeamento de pixels correspondentes entre duas capturas, originárias de duas câmeras distintas. A partir do mapeamento, identifica-se um parâmetro que representa a transformação de cores que ocorreu de um para o outro, dado que são do mesmo objeto para realizar a estabilização de uma das imagens. O presente estudo considerou o mesmo princípio, mas considerando os mosaicos da pista que estão em comum para cada época. A pesquisa, no entanto, considerou apenas a transformação de cores ignorando a variação gama, nesta fase.

Os indicadores que determinam a qualidade das calibragens é o aspecto visual analógico, no qual as imagens devem se apresentar semelhantes. Além disso, a segmentação é também um fator importante, pois utiliza parâmetros muito próximos. O indicativo da qualidade da segmentação é o aspecto visual subjetivo e os indicadores dos dados de saída, que devem estar alinhados com parâmetros utilizados na área para caracterizar o emborrachamento.

Os dados de operações de pousos e decolagens do aeroporto estudado foram obtidos por meio do programa de Dados Abertos da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2019).

Apenas o número total de operações de pouso por cabeceira em cada período foi considerado, tendo em vista que comparada a operação de decolagem é no pouso que ocorre o maior desgaste dos pneumáticos da aeronave e consequentemente um índice de contaminação do pavimento demasiadamente superior. Os dados utilizados no estudo são apresentados na Tabela 1, que reúne a quantidade de operações de pouso no aeroporto de análise nos períodos trabalhados.

Tabela 1: Operações de pousos por cabeceiras entre os meses de captura (out/21 e fev/22).

Cabeceiras	Out/21 - Dez/21	Dez/21 - Fev/22
Cabeceira 11	5.871	3.565
Cabeceira 29	1.291	1.288

3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta os resultados da aplicação do algoritmo de segmentação juntamente das estimativas da área emborrachada (dano) determinada em cada imagem. Os eixos X e Y representam respectivamente o comprimento e a altura em *pixels* de cada imagem. Observa-se, portanto, as diferenças de resolução entre as imagens, mas que foram uniformizadas para este processo.

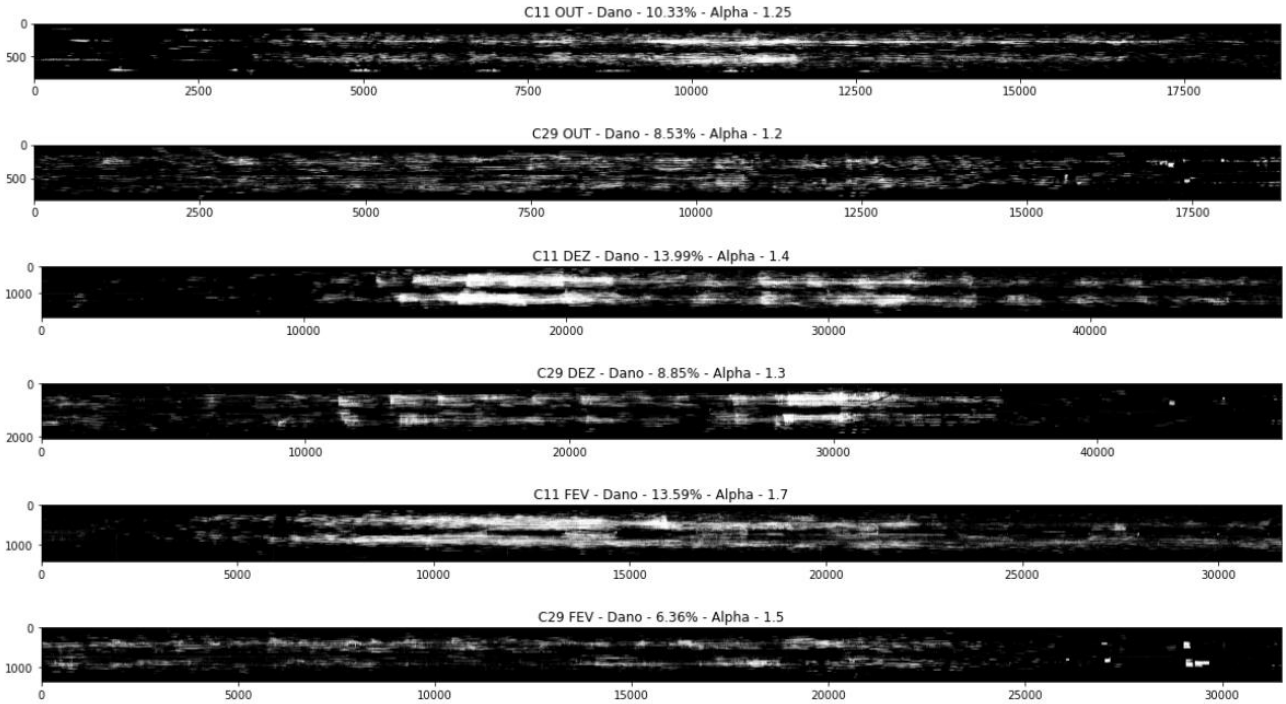


Figura 2: Resultados da aplicação da segmentação nos mosaicos originais e a estimativa de área emborrachada (dano).

Observa-se na Figura 2 que, por meio da aplicação do algoritmo de segmentação, houve maior acúmulo na cabeceira 11 da pista do que na cabeceira 29, indicando maior frequência de operações de pousos nesta cabeceira. Infere-se ainda que houve um incremento no emborrachamento de outubro para dezembro, mas um decréscimo de dezembro para fevereiro. Este último fato é explicado pela ocorrência de manutenção em período entre as datas de obtenção destas duas capturas. Outra observação é de que os parâmetros *alpha* não são uniformes (aproximadamente iguais) entre campanhas de capturas. É inclusive, impreciso apontar um padrão claro capaz de indicar qual o alpha adequado para a imagem seguinte com base no encontrado para a anterior.

O algoritmo de calibragem foi executado sobre as imagens. A imagem *calibrante* foi escolhida por sendo a da cabeceira 11 da captura de outubro. Dado que a imagem da cabeceira 29 de outubro possui aspectos similares, foi descartada da calibragem. Ambas as imagens de outubro foram descartadas para o novo cálculo de segmentação. As imagens passaram a assumir aspectos de tonalidade de cores observados na imagem *calibrante*, mas com intensidades indo de acordo com o brilho e o contraste geral originais de cada imagem calibrada. A Figura 3 apresenta os mosaicos calibrados das capturas dos meses de dezembro/21 e fevereiro/22.

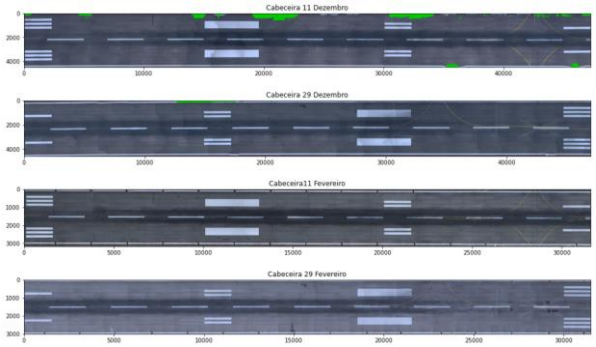


Figura 3: Imagens das cabeceiras 11 e 29 dos meses de dezembro/21 e fevereiro/22 após calibragem

A partir das quatro imagens da Figura 3, aplicou-se a segmentação, obtendo então os resultados apresentados na Figura 4. Os parâmetros alpha mais adequados foram os mesmos aplicados nas imagens originais e as estimativas obtidas também foram preservadas. Além disso, a região segmentada permaneceu inalterada em ambas as aplicações.

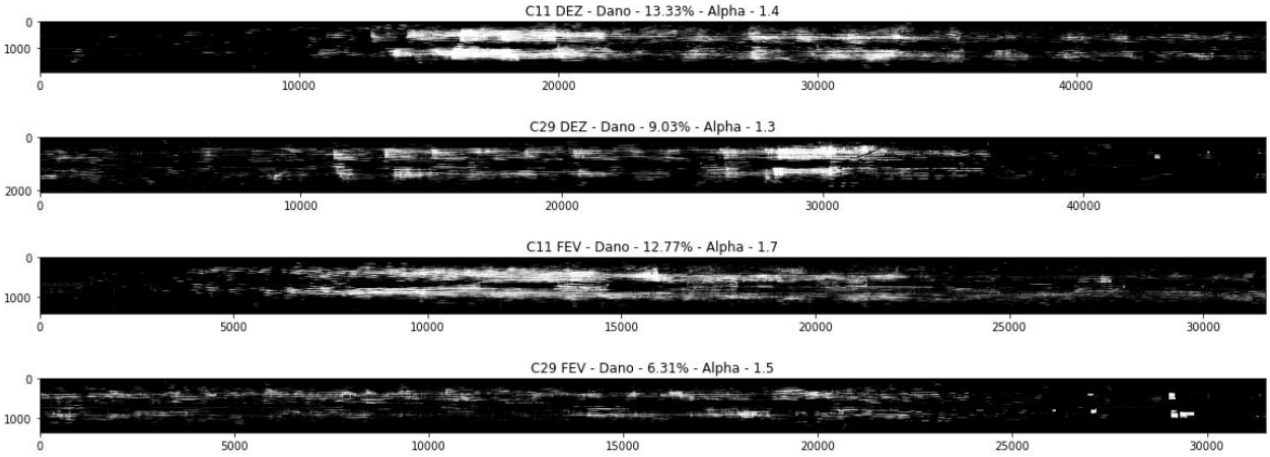


Figura 4: Resultados da segmentação nas imagens após calibragem e a estimativa de área emborrachada (Dano).

Para verificar se a restrição do processamento das imagens à faixa central da pista (área do pavimento diretamente afetada pelo emborrachamento) impacta a qualidade da segmentação, aplicou-se o filtro nas imagens cortadas e nas imagens calibradas. A Figura 5 apresenta os mosaicos sem calibração e sem os cortes e a Figura 6 apresenta os mosaicos com a calibração, porém sem os cortes.

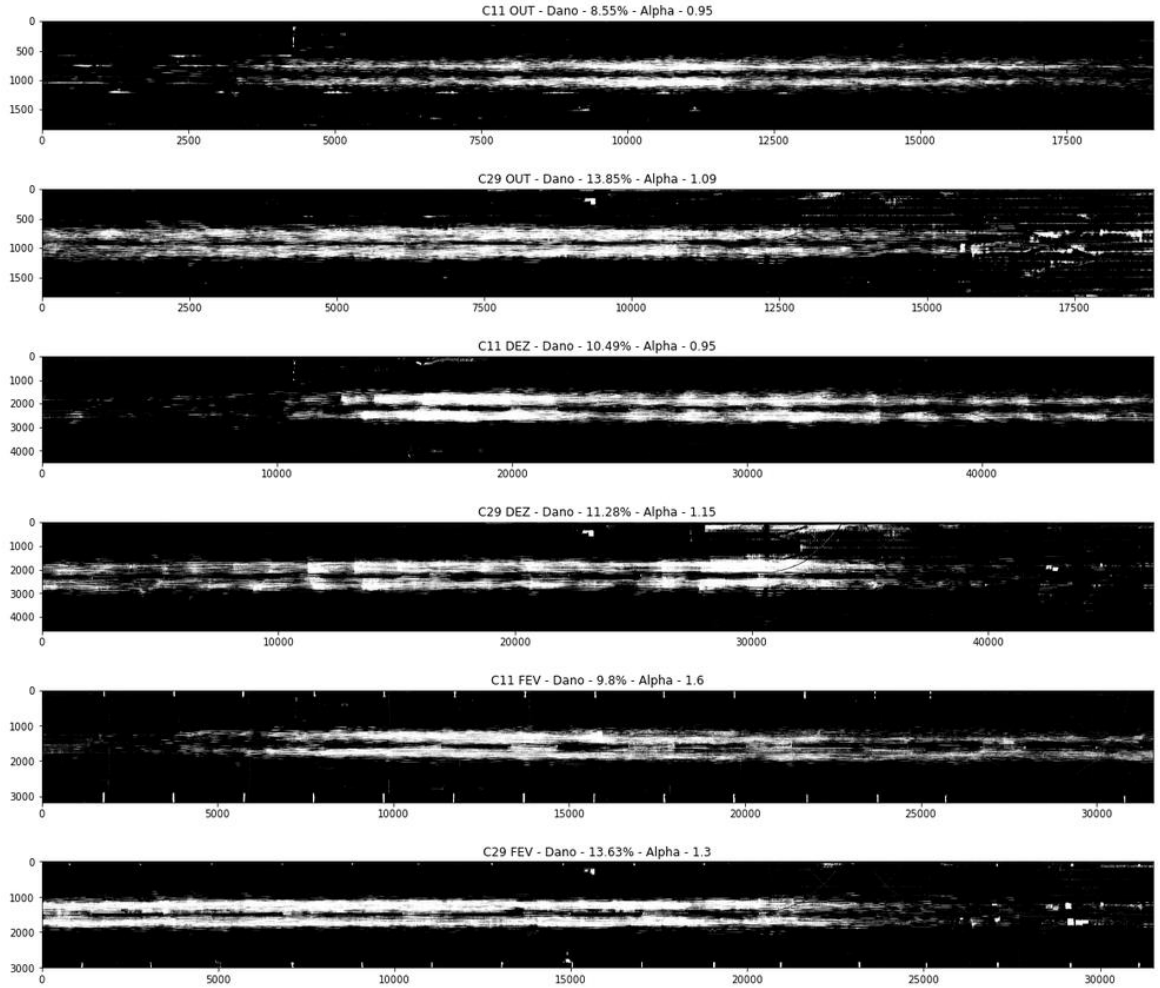


Figura 5: Resultados da aplicação da segmentação nas imagens originais sem calibragem.

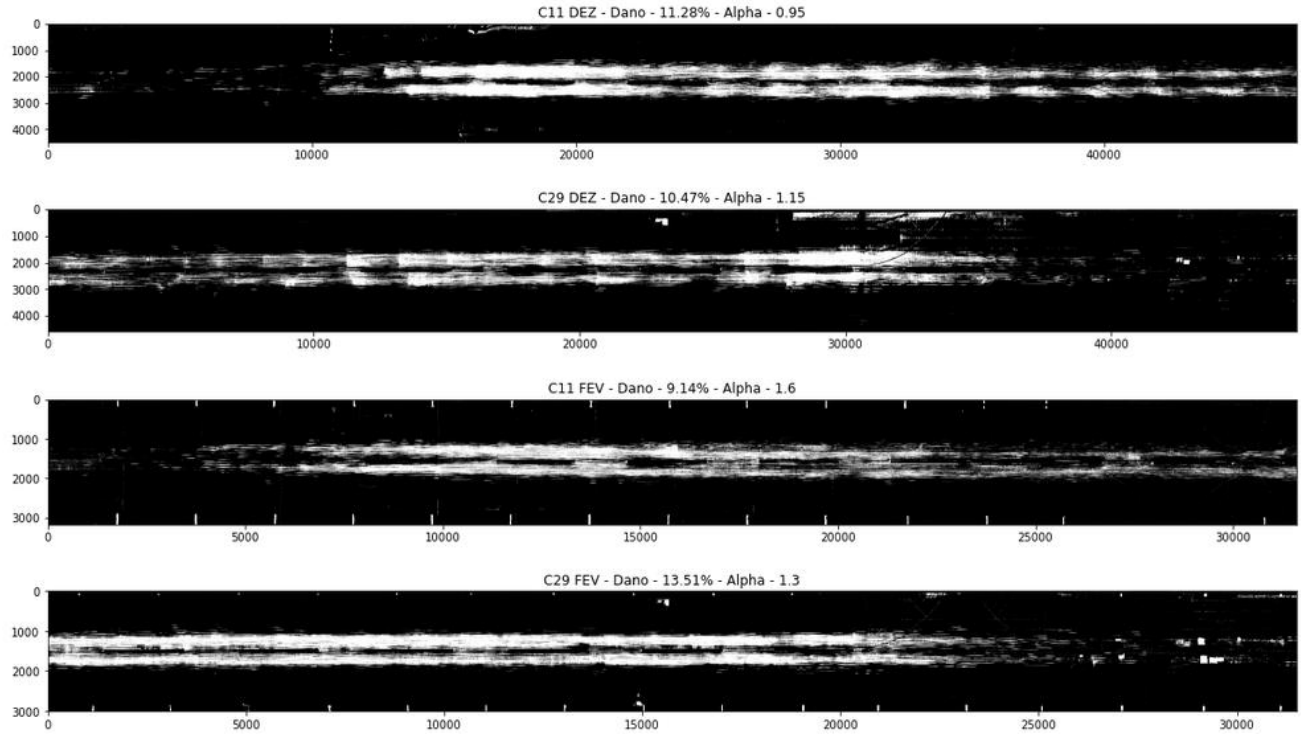


Figura 6: Resultados da aplicação da segmentação nas imagens calibradas sem os cortes

Sem os cortes, os resultados não seguem o mesmo padrão anterior e não possuem comportamento condizente com os da Tabela 1. Desta maneira os dados erroneamente sugerem que a cabeceira 29 possuiu maior acúmulo com relação à 11, consequentemente maior frequência de operações. Além disso, indicam que para a cabeceira 11 houve um aumento gradual, ao passo que para a 29 houve um decaimento em dezembro/21, com relação a outubro/21. Com relação a fevereiro/22, haveria um aumento comparado com dezembro/21. Esses resultados das imagens não cortadas e sem calibragem não são corroboram com os dados de volume de operações, demonstrando que a restrição do estudo à porção central da pista impacta na consistência final dos dados. A operação de corte do mosaico ainda elimina regiões das laterais que contam com pinturas da pista e artefatos, como observado nos mosaicos de dezembro/21, que interferem na segmentação.

A Tabela 2 sintetiza os resultados agregando os dados de estimativas por cabeceira, mês de captura e pela realização de corte e calibração.

Tabela 2: Tabela comparativa dos resultados de percentual de área emborrachada por tipo de processamento.

Data	Percentual de área emborrachada (dano)							
	Cabeceira 11				Cabeceira 29			
	S/Corte S/Calibr.	S/Corte C/Calibr.	C/Corte S/Calibr.	C/Corte C/Calibr.	S/Corte S/Calibr.	S/Corte C/Calibr.	C/Corte S/Calibr.	C/Corte C/Calibr.
Out/21	8,55	10,33	10,33	10,33	13,85	8,53	8,53	8,53
Dez/21	10,49	12,28	13,99	13,33	11,28	10,47	8,85	9,03
Fev/22	9,8	9,14	13,59	12,77	13,63	13,51	6,36	6,31

Definindo como Período 01 o ocorrido entre Out/21 e Dez/21 e Período 02 o ocorrido entre Dez/21 e Fev/22. A Tabela 3 apresenta a variação entre os percentuais das áreas emborrachadas, nos dois períodos, em diferentes critérios de processamento da imagem (corte e calibração).

Tabela 3: Variação percentual da área emborrachada entre as datas de levantamento

	Processamento da imagem	Variação % emborrachado	
		Período 1 (Out/21-Dez/21)	Período 2 (Dez/21-Fev/22)
Cabeceira 11	S/Corte S/Calibr.	1,94	-0,69
	S/Corte C/Calibr.	1,95	-3,14
	C/Corte S/Calibr.	3,66	-0,40
	C/Corte C/Calibr.	3,00	-0,56
Cabeceira 29	S/Corte S/Calibr.	-2,57	2,35
	S/Corte C/Calibr.	1,94	3,04
	C/Corte S/Calibr.	0,32	-2,49
	C/Corte C/Calibr.	0,50	-2,72

Observa-se uma variação percentual negativa no Período 2 em quase todos os modos de processamento da imagem. Tal resultado pode ser explicado devido à um serviço de remoção de borracha que ocorreu logo após a data de aquisição do segundo grupo de imagens (Jan/21). Mesmo com a realização do serviço, o percentual de emborrachamento no período 2 obteve uma menor redução na cabeceira 29, exatamente a cabeceira que apresenta menos operações de pouso e consequentemente a cabeceira que teve o serviço de remoção de borracha mais preservado no Período 2 (menor contaminação).

Foi comparada então a evolução do percentual de área emborrachada com o volume de operações de pouso ocorrido nestes mesmos períodos. A Figura 3 apresenta a representação gráfica destas variações na cabeceira 11 (a) e na cabeceira 29 (b). Observa-se que as opções de análise das imagens utilizando a restrição de área avaliada (corte) tendem a seguir a mesma variação de operações de pouso naquela cabeceira, um possível indicativo de correlação. A inclinação menos acentuada da variação de emborrachamento observado na figura 3(b) pode ter sido causada por uma menor eficiência na remoção de borracha desta cabeceira, ou uma combinação de maior emborrachamento causado pela influência de uma maior temperatura ambiente que ocorre neste período do ano na região.

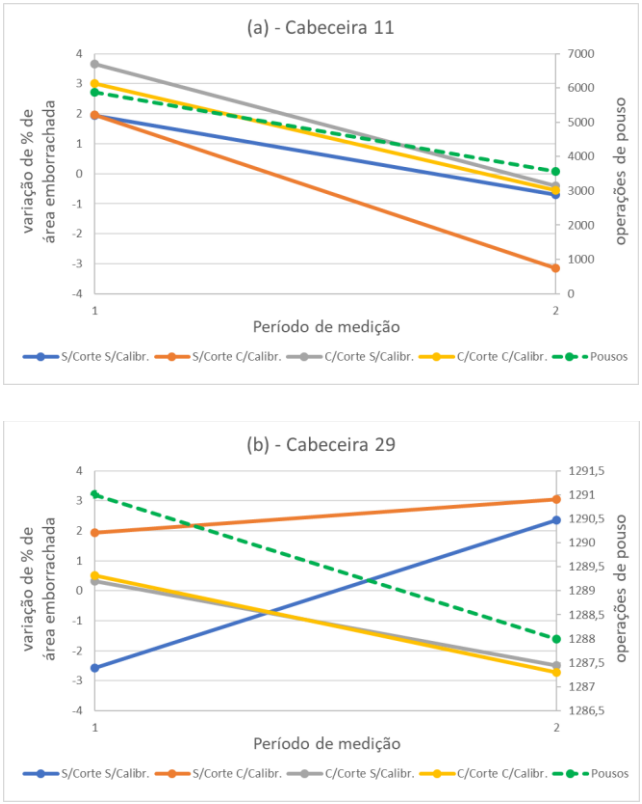


Figura 3: Variação percentual da área emborrachada entre as datas de levantamento na cabeceira 11 (a) e na cabeceira 29 (b)

O maior volume observado na frequência de operações de pouso sugeria que a cabeceira 11 deveria possuir maior percentual de depósito de borracha que a cabeceira 29. Além disso, os valores sugeriam ainda que o depósito deveria ter sido maior entre outubro/21 e dezembro/21 do que entre dezembro/21 e fevereiro/22 em ambas as cabeceiras.

As imagens demonstram, contudo, uma redução da área emborrachada entre dezembro/21 e fevereiro/22, justificado possivelmente pela ocorrência de remoção de borracha após a data de captura de dezembro/21. Isso sugere ainda que, mesmo após essa remoção, o acúmulo de borracha tenha sido menor no segundo período em decorrência de um menor volume de tráfego.

4. CONCLUSÕES

A partir deste trabalho é possível identificar que para os dados estudados não houve indicativos de que as diferenças de tonalidades entre diferentes imagens prejudicassem a aplicação de segmentação no processamento digital. Por outro lado, foi observado que cortes nas imagens, o brilho e o

contraste geral são fatores de maior relevância e podem influenciar diretamente os resultados obtidos.

É possível afirmar que a implementação do uso de imagens e aplicação de PDI para inferir o emborrachamento do pavimento e realizar comparações entre as imagens de diferentes épocas auxilia o processo de tomada de decisão para realização de serviços de remoção de borracha, pois, proporciona uma análise que caracteriza a evolução do emborrachamento de pista. Entretanto, diferenças nas imagens, que podem ser causadas por fatores climáticos no momento da captura devem ser levadas em consideração no momento do processamento.

Constata-se, ainda, que é possível determinar o acúmulo de borracha pelo seu aspecto visual de forma automatizada e passível de validação com parâmetros volumétricos de operações de pouso e decolagens. Contudo, é importante atentar-se aos cortes nas imagens para a exclusão de elementos da pista que interfiram nos resultados (artefatos, remendos e pinturas) e à determinação dos parâmetros ideais para aplicação de algoritmos de processamento automatizado.

Uma coleta de dados de mais períodos, incluindo dados mais detalhados das operações de pouso (temperatura, peso da aeronave, condição de umidade da pista) promoveriam a elaboração de um modelo matemático de previsibilidade de indicativo de remoção de borracha da pista de pouso e decolagem.

Espera-se que o trabalho, por meio dos parâmetros estudados, possa auxiliar operadores de aeródromos em tomadas de decisão de processos de manutenção de pistas de pouso e decolagem, e, com isso, incrementar a segurança das operações em aeroportos brasileiros.

BIBLIOGRAFIA

ABDULJABBAR, A. S.; SALMAN, N. D.; JALEEL, Z. T. Design of an Expert System for Airport Rubber Removal. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [*s. l.*], v. 737, n. 1, 2020. Disponível em: Acesso em: 30 ago. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **IS Nº 153.205-001 - Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista pouso e decolagem**. Brasil: 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **RBAC nº 153 Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à emergência**. Brasil: 2021.

AKBAR, J.; SHAHZAD, M.; MALIK, M. I.; UL-HASAN, A.; SHAFAIT, F. Runway Detection and Localization in Aerial Images using Deep Learning. **2019 Digital Image Computing: Techniques and Applications, DICTA 2019**, [*s. l.*], 2019. Disponível em: Acesso em: 23 ago. 2022.

ANAC. **Dados abertos — Agência Nacional de Aviação Civil ANAC**. [*S. l.: s. n.*], 2019. Disponível em: https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos. Acesso em: 14 maio 2022.

COTTER, B.; SMITH, S. **Expeditionary rubber removal capability**. [*S. l.: s. n.*], 2006. Disponível em: http://www.dtic.mil. .

FAA. **AC 150/5320-12C - MEASUREMENT, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF SKID-RESISTANT AIRPORT PAVEMENT SURFACES**. 18 mar. 1997. Disponível em: Acesso em: 30 ago. 2022.

GRADOLEWSKI, D.; DZIAK, D.; KANIECKI, D.; JAWORSKI, A.; SKAKUJ, M.; KULESZA, W. J. A Runway Safety System Based on Vertically Oriented Stereovision. **Sensors 2021, Vol. 21, Page 1464**, [*s. l.*], v. 21, n. 4, p. 1464, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1464/htm. Acesso em: 23 ago. 2022.

ICAO. Airport Services Manual: Part 2, Airport Surface Conditions. **Doc 9137**, [*s. l.*], 2002.

MCKEEN, R. G.; LENKE, L. R. **Alternatives for runway rubber removal from**

porous friction surfaces. Albuquerque: [*s. n.*], 1984.

PARKER, A.; GONZALEZ, F.; TROTTER, P. Live Detection of Foreign Object Debris on Runways Detection using Drones and AI. **2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)**, [*s. l.*], p. 1–13, 2022. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9843697/. Acesso em: 23 ago. 2022.

THANH, O. V.; CANHAM, T.; VAZQUEZ-CORRAL, J.; RODRIGUEZ, R. G.; BERTALMIO, M. Color Stabilization for Multi-Camera Light-Field Imaging. **ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings**, [*s. l.*], v. 2020-May, p. 2148–2152, 2020. Disponível em: Acesso em: 24 ago. 2022.

WATERS, J. C. Ultra high pressure Watercutting-Rejuvenating the microtexture of polished surfacings. **Transit New Zealand International Conference on Surface Friction for Roads and Runways**, [*s. l.*], 2005. Disponível em: Acesso em: 23 ago. 2022.

YEN, J. C.; CHANG, F. J.; CHANG, S. A New Criterion for Automatic Multilevel Thresholding. **IEEE Transactions on Image Processing**, [*s. l.*], v. 4, n. 3, p. 370–378, 1995. Disponível em: Acesso em: 24 ago. 2022.

YOUNG, S. B.; WELLS, A. T. **Aeroportos - Planejamento e Gestão**. 6. ed. [*S. l.: s. n.*], 2014. 2014. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Aeroportos_6_ed.html?hl=pt-BR&id=JmDiAwAAQBAJ. Acesso em: 23 ago. 2022.

.

MODELAGEM PREDITIVA DE CRESCIMENTO URBANO EM REGIÃO AEROPORTUÁRIA - UM ESTUDO DE CASO

Natália Xavier Moreira[1]*, Matheus Novaes Valinho[2], Michelle C. da S. P. Bandeira[3], Anderson Ribeiro Correia[4], Cristiano Farias Almeida[5], Gerson dos Santos Lisboa[6]
Universidade Federal de Goiás (UFG)[1,3,5,6], Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)[2,4]

***Endereço de e-mail do autor correspondente:** natalia_xavier@discente.ufg.br

PAPER ID: SIT220

ABSTRACT
The United Nations Development Program published in 2013 the Human Development Index in Municipalities for the years between 1991 and 2010 in Brazil. The development of the municipality of Aparecida de Goiânia was of great importance due to of the value of its growth being greater than the average of the national and state growth. For there to be growth in the GDP of a municipality or country, there must be a turnover in the economy, largely caused by industries, companies, in addition to government investments.The Antares Aeronautical Complex is an example of this investment, as it is a project aimed at executive aviation, aircraft maintenance and logistics. Due to the points mentioned, this work aims to estimate the growth rate of the municipality of Aparecida de Goiânia for the next five years, based on variables of airport and economic characteristics.The methodology of this paper was divided into three main stages: i) Data collection; ii) Processing and selection of variables; iii) Prediction model based on linear regression. Despite being an early stage study, the model showed good accuracy when adjusted for estimates and can still make predictions for new data and applied to other Brazilian municipalities.

Keywords: Predictive model; Urban growth; Airports.

RESUMO
O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento publicou em 2013 o Índice do desenvolvimento Humano em Municípios em relação aos anos entre 1991 e 2010 no Brasil. O desenvolvimento do município de Aparecida de Goiânia foi de grande relevância em função do valor do seu crescimento ser maior que a média do crescimento nacional e estadual. Para que haja crescimento no PIB de um município ou país, é preciso que haja rotatividade na economia, provocada em grande parte pelas indústrias, empresas, além de investimentos do governo. O Polo Aeronáutico Antares é exemplo desse investimento, pois, é um projeto voltado para aviação executiva, manutenção de aeronaves e logística. Em virtude dos pontos citados, esse trabalho tem por objetivo estimar a taxa de crescimento do município de Aparecida de Goiânia pelos próximos cinco anos, baseando-se em variáveis de características aeroportuárias e econômicas. A metodologia deste *paper* foi dividida em três principais etapas: i) Coleta de dados; ii) Processamento e seleção das variáveis; iii) Modelo de previsão baseado em regressão linear. Apesar de ser um estudo em fase inicial, o modelo apresentou uma boa acurácia quando ajustado para as estimativas e ainda pode realizar previsões para novos dados e aplicado para outros municípios brasileiros.

Palavras-chave: Modelo de previsão; Crescimento urbano; Aeroportos.

AGRADECIMENTOS

Minha intrínseca gratidão a Deus, família e amigos. Apresento meus sinceros agradecimentos à minha professora Drª. Michelle Galvão que viu o potencial diante de um simples trabalho universitário e com grandes esforços chegamos até aqui. Ainda à ela, agradeço por ter me apresentado o setor aeroportuário, pois a cada oportunidade de aprender sobre, o meu interesse pela carreira também cresce. Apresento meus profundos agradecimentos ao Matheus Valinho, por também ter visto potencial no trabalho e se comprometido tanto com o melhor resultado possível diante dos presentes recursos; agradeço a paciência e disposição em me orientar e contribuir no trabalho. Aos senhores Cristiano Almeida, Gerson Lisboa e Anderson Correia, agradeço o interesse no trabalho e contribuição com os resultados presentes e aos prováveis posteriores.

1. INTRODUÇÃO

O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) publicou em 2013 o Índice do Desenvolvimento Humano nos Municípios (IDHM) em relação aos anos entre 1991 e 2010 no Brasil.

O critério utilizado para classificar esse índice é composto pelas variáveis: saúde, educação e renda, valendo ao todo de 0 a 1,000. Quando comparados os índices de 1991 e 2010, observa-se um crescimento expressivo de 47,5%, saindo de uma classificação considerada baixa de 0,493, para uma classificação considerada alta de 0,727.

O município de Aparecida de Goiânia (Goiás) é uma fração desse crescimento visto que no período em análise obteve-se um crescimento de 61,35%, sendo, educação a variável com maior avanço, de 0,403 para 0,620. O desenvolvimento do município foi de grande relevância em função do valor do seu crescimento ser maior que a média do crescimento nacional (47,46%) e estadual (50,92%).

Contudo, o desenvolvimento de Aparecida não se manteve inerte ao longo dos anos. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o produto interno bruto (de aparecida de Goiânia, 2017) per capita do município em 2010 era de R$12.745,52, já em 2019 subiu para R$24.855,27. O Produto Interno Bruto (PIB) per capta é equivalente a variável renda, critério utilizado na classificação do IDHM. Para que haja crescimento no PIB de um município ou país, é preciso que haja rotatividade na economia, provocada em grande parte pelas indústrias, empresas, além de investimentos do governo.

O Polo Aeronáutico Antares é exemplo desse investimento, pois, é um projeto voltado para aviação executiva, manutenção de aeronaves e logística. Foi escolhido singularmente para estar situado no centro-oeste que tem grande influência nesse cenário por possuir 46% dos aeródromos privados no Brasil, concentrando grande parte da movimentação da aviação do país. Localizado numa área de 209 hectares, portador de uma pista de pouso e decolagem de 1980 metros e 200 lotes comerciais, o Polo Aeronáutico Antares ainda em fase de implementação já tem oferecido infraestrutura urbana para a região, como pavimento asfáltico, energia elétrica, tratamento de água e linhas de transporte público. Com isso, a gestão do polo espera atrair novas indústrias do setor impulsionando a economia do município.

A região atribuída como objeto de estudo carrega características importantes, que caso não integradas ao planejamento sistêmico da implementação do polo, pode gerar modificação na geografia social, consequência negativa do processo de gentrificação e levar a população a uma percepção de empobrecimento, resultado oposto à proposta da prefeitura e empresários, que é impulsionar o desenvolvimento da economia.

Em virtude dos pontos citados, esse trabalho tem por objetivo estimar a taxa de crescimento do município de Aparecida de Goiânia pelos próximos cinco anos, baseando-se em variáveis de características aeroportuárias e econômicas; crescimento esse que foi fomentado pela implementação do Polo Aeronáutico Antares. A partir dos resultados encontrados, a taxa de crescimento porderá servir como orientação na elaboração do planejamento regional do município e/ou outras atribuições.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Vista a contextualização do que será abordado neste trabalho, essa seção é destinada a descrição de algumas termos citados e a maneira em que foram abordados anteriormente da literatura.

2.1. GENTRIFICAÇÃO

Na literatura o conceito de gentrificação não é unânime entre os pesquisadores, ora é defendido como um fator importante no desenvolvimento de uma região, ora como um fator que atua prioritariamente em prol da elite social, assim, desconsiderando a sociedade de baixa renda. No contexto urbano, com a presença gradativa da gentrificação alguns processos se tornam mais proeminentes e são com base neles que os pesquisadores defendem seu conceito sobre o termo. "Esses processos são a modificação da geografia social, que é quando há substituição de um grupo social por outro; reagrupamento espacial, vista a

cultura e estilos de vida em comum que determinado grupo possa ter; a transformação do local, oferecendo desenvolvimento e progresso na paisagem e infraestrutura urbana; e crescimento de habitação, vista as modificações dos valores imobiliários. (Mendes, 2008; das Chagas, 2018)

Para o geógrafo Chris (Hamnett, 2003), a gentrificação é um processo essencial para o desenvolvimento urbano, ele descreve: "Eu vejo a gentrificação como um processo essencial baseado em classe, pelo qual as áreas da classe trabalhadora ou degradadas da cidade são transformadas em áreas residenciais de classe média, muitas vezes com alteração auxiliar no uso comercial. Não acho que a gentrificação sempre envolve deslocamento ou que este é a principal causa do declínio da classe trabalhadora. (Davidson, 2011)."

Em contrapartida, a socióloga urbanística Glass (1964) descreve o processo da seguinte maneira: "Um por um, muitos dos bairros de classe trabalhadora foram invadidos pela classe média superior e inferior. Modestas habitações foram tomadas e transformadas em residências elegantes e caras... Uma vez que esse processo de 'gentrificação' começa em um distrito, prossegue rapidamente até que todos ou a maioria dos ocupantes da classe trabalhadora sejam deslocados e todo o caráter social do distrito seja mudado." (Lees, 2008)

Ainda fundamentado na literatura, foram identificados trabalhos que relacionam os conceitos de gentrificação e aerotrópole e/ou aeroporto, dentre eles Almeida-Cedeplar et al. (2019) que relaciona aerotrópole e gentrificação em um caso do norte eixo de Belo Horizonte, Brasil; no mesmo contexto ALMEIDA (2016), sobre o caso norte eixo de Belo Horizonte, Brasil; e Eken (2020) que relaciona aeroporto e gentrificação em um caso na Turquia.

2.2. CRESCIMENTO URBANO EM REGIÕES AEROPORTUÁRIAS

Muitos aeroportos internacionais foram pioneiros em estudos sobre o impacto econômico e sua infraestrutura e as operações trouxeram contribuições significativas para as economias locais, estaduais (regionais) e/ou nacionais (ICAO, 2005). Assim, para modelar os impactos econômicos da infraestrutura aeroportuária, é necessário delimitar quais indicadores devem ser observados, e quais devem ser aplicados.

A fim de identificar os valores agregados gerados pelos aeroportos e por suas interações ao redor da comunidade, Baltazar et al. (2011) apresentaram uma abordagem sobre o impacto do desenvolvimento econômico capturando os impactos socioeconômicos reais. Segundo estes autores, as variáveis medidas mais recorridas a tal proposta incluem empregos, salários, gastos locais e regionais e níveis de tráfego aéreo.

Grande parte dos estudos mostra uma análise de previsão da contribuição econômica por meio desses efeitos utilizando indicadores já contemplados na literatura (Zhang & Graham, 2020; Costa, 2020), já os estudos de Haddad et al. (2015); Huderek-Glapska et al. (2016), avaliam a infraestrutura mediante um contexto histórico, avaliando os efeitos anteriores e posteriores, para depois apresentar previsões assertivas sobre os mesmos. Ainda assim, a análise do impacto econômico utilizando indicadores como o PIB da região e do País, por exemplo, foi explorado por Haddad et al. (2015) na análise do impacto econômico para o transporte ferroviário no Estado de São Paulo, onde foi levado em consideração o tráfego de passageiros, os empregos diretos e indiretos e a renda.

Com relação ao transporte aéreo e sua região, de acordo com os estudos de John Kasarda (2000, 2004, 2006), os aeroportos metropolitanos tem sido um dos polos centrais para o desenvolvimento em sua região, ainda relata que o modal de transporte aéreo está formando o espaço urbano no século XXI, igualmente as rodovias no século XX. Visto os possíveis resultados futuros, o especialista em planejamento urbano Nolen (1928) abordou assuntos sobre a influência de uma infraestrutura aeroportuária no território urbano. Realizou uma análise com diversas condições de localização, como área, clima, acessibilidade, propriedade e topografia, com finalidade de encontrar recursos que não estão diretamente relacionados à aviação, mas que, ano pós ano, se tornam cada vez mais essenciais para os aeroportos, a receita não-aeronáutica (lojas, restaurantes, estacionamento, etc.). Os estudos de Brueckner (2003); Green (2007); Bandeira et al. (2021) analisaram

a contribuição econômica de um aeroporto para o desenvolvimento de sua região, ainda defendem que um bom serviço aeroportuário é um fator importante para a expansão de sua infraestrutura e crescimento econômico e urbano local.

Hakfoort et al. (2001), por sua vez, analisou o impacto econômico na região do aeroporto Schiphol de Amsterdã no período de 1987 a 1998 com base nos dados de emprego na região. Outro importante estudo é de Huderek-Glapska et al. (2016), eles fazem uma modelagem do impacto do transporte aéreo na economia da Polônia, com base no PIB, emprego e renda.

Diante da literatura abordada, estudos consolidados foram baseados em crescimento urbano nas regiões aeroportuárias e o impacto econômico que esse transporte aéreo pode acarretar. Entretanto, ainda não há consenso em relação aos fatores que possibilitam essas faces. Mediante isso, é proposta uma análise do impacto econômico do transporte aéreo a partir dos dados históricos do Brasil, com o intuito de projetar um taxa de crescimento futura.

3. OBJETO DE ESTUDO

Em "A aerotrópole Antares da pólis de Aparecida de Goiânia", dos Santos Neto (2021) traz com clareza as diferenças conceituais entre aeroporto, aerotrópole e onde o Polo Aeronáutico Antares se adequa, portanto, o objeto de estudo do autor foi o mesmo que o presente trabalho. Os termos podem ser brevemente descritos da seguinte forma – aeroporto: "Espaço físico de aeródromo, edificações e equipamentos para apoios às aeronaves e de processamento de pessoas e/ou cargas" (ANAC, 2022); aerotrópole: "Cidades construídas em torno de aeroportos, a fim de conectar rapidamente fornecedores, fabricantes, distribuidores, empresários, mercados e clientes." (Kasarda, 2013). Por fim, para (dos Santos Neto, 2021), o Polo Aeronáutico Antares é um aeroporto e nas palavras do mesmo "não há dúvidas que o Antares Polo Aeronáutico é um catalisador de investimentos locais, em função da atração do expressivo número de empreendimentos imobiliários, em seu entorno."

Assegurando tal infomação, o prefeito do município, Gustavo Mendanha (Polo aeronáutico antares vai gerar 3 mil empregos em aparecida, n.d.), salienta a possibilidade do aumento da oferta de empregos direta e indiretamente, além de que 450 novas empresas podem se instalar em Aparecida de Goiânia. Numa perspectiva bilateral da situação, o comandante Francisco Lyra, CEO do terminal de aviação geral do Aeroporto Internacional de Guarulhos (São Paulo), diz que ao mesmo tempo que o município se beneficia com a geração desses empregos, ele atrai ainda mais um núcleo de atividades econômicas, sendo assim, uma própria cadeia de suprimentos.

Por fim, o empreendimento demandará um investimento na ordem de R$ 100 milhões e será voltado para aviação executiva, manutenção de aeronaves e operações logísticas. Ao todo, serão 2,096 milhões m² de área total, dos quais 611 mil m² de área vendável, distribuídas em 455 hangares com metragens entre 1.000 m² e 1.500 m². O polo também contará com uma ampla estrutura de apoio como lojas, restaurantes e um hotel executivo. A principal estrutura a ser construída no Antares Polo Aeronáutico, a pista de pouso e decolagens contará com 1.980 metros de extensão ou comprimento, por 30 de largura, o que dá um total de 54 mil m².

4. METODOLOGIA

A metodologia deste *paper* foi dividida em três principais etapas: i) Coleta de dados; ii) Processamento dos dados; iii) Modelo de previsão. A Figura 1 detalha o fluxograma metodológico.

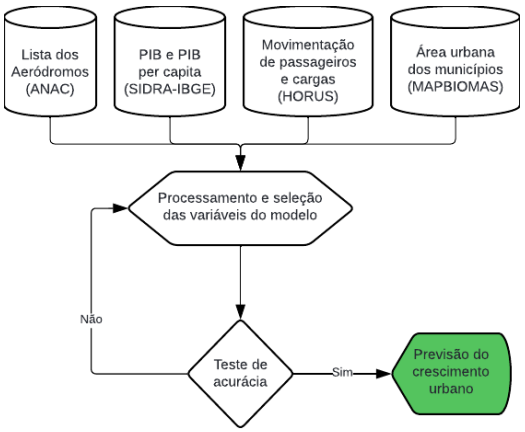


Figura 1 Fluxograma metodológico. Fonte: Autor (2022).

Conforme a Figura 1, os dados foram re-

tirados de quatro fontes principais. Através da Lista de Aeródromos Públicos da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2020) foram coletadas as características dos aeroportos como código ICAO, município implantado, comprimento e largura de pista.

No Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2019) foram retirados o PIB e o PIB per capita de cada município sede dos aeroportos referêntes à coleta anterior.

Através do Sistema Hórus (2022) foram extraídos os dados de movimentação de passageiros e cargas com finalidade de identificar a característica de cada aeroporto. Se tal seja cargueiro, de passageiros ou ambos.

A área urbana de cada município sede desses aeroportos foram retiradas da plataforma MapBiomas (2022), com o objetivo de analisar a dinâmica de crescimento antes e após a inauguração dos aeroportos.

A construção do banco de dados deste trabalho passou por algumas limitações nas quais, a fonte SIDRA disponibiliza o PIB e o PIB per capita apenas no período de 2002 até 2019. Ressaltando que o objetivo é identificar a urbanização municipal no período pré e pós implantação do aeroporto, foram então selecionados como base apenas os aeroportos inaugurados durante esse período.

Portanto, os dados do SIDRA e do Hórus foram coletados por cinco anos após início das operações de cada aeroporto. Já os dados do MapBiomas foram considerados cinco anos antes e cinco anos após a inauguração dos mesmos.

No tratamento dos dados foram criadas duas variáveis *dummies* para identificar se os aeroportos selecionados são cargueiros, de passageiros, ou de ambas as operações. Além disso, os dados do PIB e do PIB per capita foram deflacionados de acordo com o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IBGE, 2010) com base no ano de 2010.

Após o tratamento e a padronização dos dados, enfim foi construído o modelo de previsão do crescimento urbano baseado em regressão linear de (Wooldridge, 2015), representado pela Equação 1.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad (1)$$

Onde, Y é a variável dependente e Y_i é o valor predito de Y dado um X_i; X é a variável independente; β_0 é o valor previsto de Y quando X for igual ao intercepto; β_1 é o quanto Y muda, em média, por unidade de mudança em X (inclinação); e_i é a estimativa do erro.

As variáveis utilizadas no modelo estão descritas na Tabela 1. A variável dependente (Y) utilizada foram as áreas preditas do município referentes aos cinco anos após a implantação do aeroporto (AP_1...5), o restante foram as variáveis independentes (X).

Tabela 1 Descrição das variáveis utilizadas no modelo

Variáveis	Descrição
dPAX	Dummy de aeroporto de passageiros (binária)
dCAR	Dummy de aeroporto de cargas (binária)
PIB_1...5	PIBs do município dos 5 anos após a implantação do aeroporto (R$)
PIBpc_1...5	PIBs per capita do município dos 5 anos após a implantação do aeroporto (R$)
AA_5...1	Áreas do município dos 5 anos antes da implantação do aeroporto (ha)
AP_1...5	Áreas preditas do município dos 5 anos após a implantação do aeroporto (ha)
CP	Comprimento da pista (m)
LP	Largura da pista (m)

A validação do modelo foi dada a partir da estimativa das áreas dos municípios, que foram utilizados como referência, dos 5 anos após a implantação do aeroporto. Esta estimativa apresentou uma acurácia de 93,86%.

Após o detalhamento metodológico, na próxima seção serão apresentados os resultados de previsão do crescimento urbano para o município proposto de Aparecida de Goiânia, baseado em dados históricos de outros municípios sedes de aeroportos durante o período de implantação do aeroporto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após os ajustes do modelo, a seguir na Tabela 2 estão apresentados os resultados da predição do crescimento urbano do município de Aparecida de Goiânia - GO baseado em exemplos de cidades com sedes aeroporturárias dos próximos cinco anos (2023-2027).

Analisando a Tabela 2, inicialmente o R^2 in-

Tabela 2 Resultados do modelo preditivo para o crescimento urbano do município de Aparecida de Goiânia-GO

X	AP_1	AP_2	AP_3	AP_4	AP_5
Intercepto	-6,34e+01***	-4,17e+01**	-7,98e+01***	-5,91e+01*	-5,16e+01**
dPAX	-1,99e+01*	-4,93e-01	-1,23e+01	3,76e+00	2,99e+00
dCAR	-1,71e+00	-8,25e+00	1,82e+00	-1,42e+01	-2,55e+01**
PIB_1...5	2,10e-09	4,27e-11	-1,81e-08*	-1,87e-08*	-2,38e-08***
PIBpc_1...5	1,36e-03*	1,22e-03*	3,84e-03***	2,20e-03*	3,62e-03***
AP_1...5	1,00e+00***	1,01e+00***	1,02e+00***	1,02e+00***	1,02e+00***
CP	3,99e-03	-4,06e-03	-8,40e-03	-3,25e-02	-2,86e-02*
LP	1,72e+00**	1,34e+00*	1,61e+00	2,98e+00**	2,19e+00*
R^2	0,89	0,84	0,86	0,87	0,91
Teste Shapiro-Wilk	0,136	0,119	0,124	0,098	0,127

$*p < 0.05$; $**p < 0.01$; $***p < 0.001$

dica que o modelo explica consideravelmente a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média. Em geral, quando o R-quadrado mais próximo de 1, melhor o modelo se ajusta aos seus dados. No entanto, o R-quadrado não pode determinar se as estimativas e predições dos coeficientes são tendenciosas.

Para isso abordamos o teste de normalidade de Shapiro-Wilk. A hipótese nula deste teste é de que os dados vem de uma distribuição normal, então para um nível de significância de 5%, se o resultado do p-value no teste for maior que 0,05, indica que não rejeitamos a hipótese nula e que a amostra vem de uma distribuição normal.

Portanto, a avaliação do modelo demonstrou que os critérios estabelecidos pelo métodos dos mínimos quadrados foram atendidos, e que o modelo será capaz de realizar previsões para novos dados.

Sendo assim, a Figura 2 apresenta o crescimento urbano do município de Aparecida de Goiânia-GO nos anos pré, durante e pós implantação do Aeroporto de Antares.

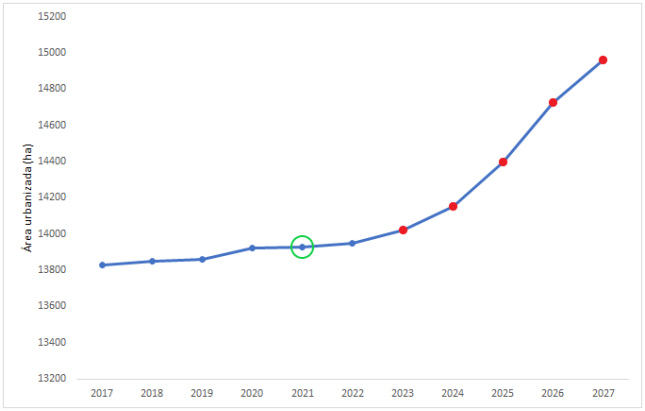


Figura 2 Processo de crescimento urbano do município de Aparecida de Goiânia-GO. Fonte: Autor (2022).

Analisando a Figura 2, em setembro de 2021 foram iniciadas as obras do Aeroporto de Antares no município de Aparecida de Goiânia. Durante o período de 2017 a 2021 o município passa por um pequeno crescimento, com uma taxa de aproximadamente 0,7%. Após o início das obras, de acordo com o modelo de previsão deste trabalho baseado nos exemplos de cidades sedes aeroportuárias, o município passará por um expressivo crescimento. Do ano de 2022 até o ano de 2027, nesta localidade estima-se uma taxa de crescimento de aproximadamente 6,8%.

Portanto, depois de apresentado os resultados do modelo de predição para o crescimento do município de Aparecida de Goiânia-GO baseado em histórico das cidades sedes aeroportuárias, na próxima seção estão descritas as conclusões deste trabalho.

6. CONLCUSÕES

Como apresentado neste *paper*, foi proposto um modelo para estimar o crescimento urbano de um município que dispõe de um aeroporto, nos anos seguintes da implantação do mesmo. Este trabalho foi orientado a dados históricos de outros municípios exemplos cuja a implantação dos aeroportos foram no período de 2002 à 2019.

O modelo de previsão foi baseado na regressão linear proposta por Wooldridge (2015), onde a acurácia na validação apresentou 93,86% e ainda apresentou valores satisfatórios de R^2 e teste de normalidade para a previsão do crescimento do município de Aparecida de Goiânia dos anos de 2023 a 2027.

O município de Aparecida de Goiânia antes do início das obras do Aeroporto de Antares possuia um baixo crescimento urbano (0,7% de 2017 a 2021) e a partir da implantação do aeroporto, baseado nos dados históricos, o modelo trouxe indícios de um crescimento de aproximadamente 6,8%.

Uma vantagem deste modelo é que ele pode ser ajustado e aplicado a qualquer município brasileiro. Enretanto, ele apresenta algumas limitações, como a baixa quantidade de municípios com implantação de aeroportos no período abordado, além de não considerar outras variáveis seja de infraestrutura como de economia regional.

Ressalta-se que este é um estudo inicial e para novas análises com finalidade de dar maior robustez no modelo, recomenda-se a utilização de novas variáveis socioeconômicas, ampliar o período de análise para uma maior abrangência de municípios sede de aeroportos base e ampliar os dados da infraestrutura dos aeroportos, tanto física quanto econômica.

Referências

Almeida-Cedeplar, R. P., de Brito Brandão-Cedeplar, M. & da Silva orres Cedeplar, R. (2019).

ALMEIDA, R. (2016). From growth poles to aerotropolis: state and large scale urban projects in the era of finance dominance, SEMINÁRIO SOBRE A ECONOMIA MINEIRA.

ANAC (2020). Lista de Aeródromos Públicos. **URL:** *https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/aerodromos/lista-de-aerodromos-publicos*

ANAC (2022). RBAC 01: Regulamento Brasileiro de Aviação Civil. Definições, regras, de redação e unidades de medida.,,. **URL:** *https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-01*

Baltazar, E., Braz, J., Silva, J. & Vaz, M. (2011).

Bandeira, M. C. G. d. S. P., Zackiewicz, M., Correia, A. R., Guterres, M. X., Tozi, L. A. & dos Santos Almeida, B. (2021). Contribution of the modernization of viracopos airport to the economic development of the metropolitan region of campinas, sp, brazil Technical report.

Brueckner, J. K. (2003). Airline traffic and urban economic development, Urban Studies 40(8), 1455–1469.

Costa, V. N. G. (2020). Tourism and air transport-an economic evaluation of the oporto airport expansion project, Tourism & Management Studies 16(2), 35–42.

das Chagas, L. A. (2018).

Davidson, M. (2011). Critical commentary. gentrification in crisis: Towards consensus or disagreement?, Urban Studies 48(10), 1987–1996.

de aparecida de Goiânia, P. (2017). IDH de Aparecida cresce 61,35% em 20 anos,,. **URL:** *https://www.aparecida.go.gov.br/idh-de-aparecida-cresce-6135-em-20-anos/*

dos Santos Neto, A. P. (2021).

Eken, T. (2020). Rethinking gentrification in İstanbul through planetary urbanization PhD thesis, Middle East Technical University.

Glass, R. (1964). London: aspects of change number 3, MacGibbon & Kee,.

Green, R. K. (2007). Airports and economic development, Real estate economics 35(1), 91–112.

Haddad, E. A., Hewings, G. J., Porsse, A. A., Van Leeuwen, E. S. & Vieira, R. S. (2015). The underground economy: tracking the higher-order economic impacts of the são paulo subway system, Transportation Research Part A: Policy and Practice 73, 18–30.

Hakfoort, J., Poot, T. & Rietveld, P. (2001). The regional economic impact of an airport: The case of amsterdam schiphol airport, Regional Studies 35(7), 595–604.

Hamnett, C. (2003). Gentrification and the middle-class remaking of inner london, 1961-2001, Urban studies 40(12), 2401–2426.

Huderek-Glapska, S., Inchausti-Sintes, F. & Njoya, E. (2016). Modeling the impact of air transport on the economy-practices, problems and prospects, LogForum 12(1), 47–61.

Hórus (2022). Movimentação dos aeroportos.
URL: *https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/?auth=sMovimentacao/Desempenho*

IBGE (2010). Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo.
URL: *https://www.ibge.gov.br/estatisticas/-economicas/-precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=t=destaques*

IBGE (2022). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística,,.
URL: *https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/go/aparecida-de-goiania.html*

ICAO (2005). Economic contribution of civil aviation (ECCA) Circular 292-AT.

Kasarda, J. (2006). The rise of the aerotropolis. next am, City 35e37.

Kasarda, J. D. (2000). Aerotropolis: Airport-driven urban development, Urban Land 59(9; SUPP/1), 32–41.

Kasarda, J. D. (2013). Airport cities: The evolution, Airport World 18.

Kasarda, J. D. & Frey, A. (2004). Aerotropolis: the future form, Just-In-Time Real Estate: How Trends in Logistics are Driving Industrial Developmentpp. 92–104.

Lees, L. (2008). Gentrification and social mixing: towards an inclusive urban renaissance?, Urban studies 45(12), 2449–2470.

MapBiomas (2022). Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil.
URL: *https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/*

Mendes, L. (2008). Gentrificação e a cidade revanchista: que lugar para os movimentos sociais urbanos de resistencia? Anais do Forum Sociológico. Série II, number 18 CES-NOVA pp. 21–28.

Nolen, J. (1928).

Polo aeronáutico antares vai gerar 3 mil empregos em aparecida (n.d.). „.

SIDRA (2019). Produto Interno Bruto dos Municípios - Tabela 5938.
URL: *https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5938*

Wooldridge, J. M. (2015). Introductory econometrics: A modern approach, Cengage learning,.

Zhang, F. & Graham, D. J. (2020). Air transport and economic growth: a review of the impact mechanism and causal relationships, Transport Reviews 40(4), 506–528.

SITRAER 2022
Air Transportation Symposium

RESEARCH ACCEPTED AS AN ABSTRACT

CONCESSÕES AEROPORTUÁRIAS NO BRASIL: CONTRIBUIÇÕES PARA AVALIAÇÃO EX-POST E DECISÃO SOBRE ABORDAGENS DE LONGO PRAZO

George Christian Linhares Bezerra, Marcelo Sampaio Cunha Filho, Marcelo de Canossa Macedo, Vinicius Resende Domingues, Walmir Jose Souza
Ministério da Infraestrutura

*** Corresponding author e-mail address**: vinicius.rdomingues@gmail.com

PAPER ID: SIT229

RESUMO

A exploração da infraestrutura aeroportuária por meio do instrumento de concessão pública é uma realidade que completa uma década no contexto brasileiro, demandando reflexões acerca de abordagens para avaliação ex-post de seus resultados e orientação para a tomada de decisão do Poder Público. Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo é examinar efeitos das concessões aeroportuárias no Brasil, especificamente com relação à definição de elementos de referência para orientar estratégias de avaliação ex-post dos projetos vigentes e a tomada de decisão sobre abordagens de longo prazo. Em termos metodológicos, os estudos seguiram três etapas. Inicialmente, foram realizadas pesquisas de tipos bibliográfica e documental sobre o tema. Em seguida, dados secundários foram utilizados no âmbito de uma modelagem de avaliação sob perspectiva multidimensional e submetidos a procedimentos de avaliação de resultados. Por fim, foram aplicadas entrevistas semiestruturadas junto a atores envolvidos com o setor de transporte aéreo com interesse legítimo sobre o tema, cujos insumos foram submetidos à técnica de análise de conteúdo. Os achados orientam contribuições de dupla natureza. Primeiramente, sumariza-se a aplicação de uma estrutura de avaliação de resultados ex-post conforme uma perspectiva multidimensional. Depois, consolidam-se percepções e expectativas obtidas a partir da análise do conteúdo das entrevistas, possibilitando reflexão sobre possíveis critérios capazes de orientar decisões do poder público sobre abordagens de longo prazo para as concessões aeroportuárias. Em conclusão, o presente estudo possibilita a reflexão sobre a utilidade da adoção de critérios rastreáveis nos processos de tomada de decisão sobre as concessões aeroportuárias enquanto estratégia para garantir adequada exploração e desenvolvimento da infraestrutura aeroportuária, inclusive promovendo maior transparência para todas as partes interessadas. Assim, os achados podem orientar atividades de estudos, planejamento e gestão de atores do setor e fomentar futuras pesquisas sobre o tema.

Palavras-Chave: Concessão Aeroportuária; Infraestrutura Aeronáutica; Transporte Aéreo; Avaliação de políticas pública.

AVIATION FUEL TANKERING IN AN ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE CONTEXT

Peter O'Reilly, Fabricio Sulzbacher, Diogo Coutinho, Maria Petrescu
Embry-Riddle Aeronautical University, Gol Linhas Aéreas

*** Corresponding author e-mail address**: oreillyp@erau.edu

PAPER ID: SIT159

ABSTRACT

There are currently multiple global programs related to carbon taxes and carbon offsetting, such as EU-ETS in Europe, National Chinese ETS in China, and ICAO's CORSIA for aviation-related emissions. On the other hand, Brazil is considered an unregulated carbon market. The carbon credit purchase has been transitory, although a tangible measure for the aviation industry while more definite and expensive projects have received proper incentives to become economically attractive, such as biofuels. However, each state applies its tax rates in the Brazilian fuel scenario, named ICMS. The objectives of this paper focus on assessing the total fuel tankering quantity data used by the Brazilian airline industry, explaining the total carbon emissions related to fuel tinkering, and appraising the average cost of carbon to neutralize this practice by purchasing carbon credits. The manuscript also provides recommendations about support solutions for the adjustment of savings incorporating the neutralization of carbon emissions and a comparison of the Brazilian fuel tankering situation against the global scenario. The study highlights that the Brazilian aviation industry can sustainably neutralize the carbon emissions from the fuel tankering practice. As shown in the study, the fuel tankering practice has been highly profitable. Although the political aspects have not been the primary purpose of this study, the difference in ICMS taxes has made the aviation industry less efficient and more polluter. Our recommendation aims to level the state taxes to reduce the airlines' need to apply procedures that negatively affect the environment. Implementing carbon emission compensation/neutralization policies in the Brazilian aviation market using part of the financial savings obtained with the fuel tankering practice.

Keywords: Fuel Tankering, Carbon Mission Neutralization, Carbon Credits

THE POTENTIAL IMPACT OF A VOLUNTARY, NON-PUNITIVE SELF-REPORTING PROGRAM UNDER THE SCOPE OF THE BRAZILIAN CIVIL AVIATION AUTHORITY

Peter O'Reilly, Felipe Piton, Laercio Araujo, Heather Owen-Perry
Embry-Riddle Aeronautical University, Azul Linhas Aéreas

*** Corresponding author e-mail address**: oreillyp@erau.edu

PAPER ID: SIT160

ABSTRACT

A safety management system (SMS) is an organizational approach for identifying and controlling safety risks within an industry. One SMS feature, voluntary and non-punitive safety report programs, can provide opportunities for organizational employees to identify hazards or risks within the operation. Additionally, research indicates organizations and individuals are more likely to report hazardous experiences and errors when they are guaranteed confidentiality and protection from retaliation. Brazil has the largest airline industry in South America; however, the country currently does not have a voluntary and nonpunitive safety reporting program maintained by the Brazilian Civil Aviation Authority, Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). While individual Brazilian carriers have internal safety reporting programs, this limits the industry-level sharing of obtained safety data. Further, the Brazilian state may not be complying effectively with the safety reporting system requirement mandated in ICAO Annex 19. As one of the first studies into Brazilian safety reporting, this research used mixed methodologies, including a literature review, online survey of Brazilian commercial pilots, and structured interviews with stakeholders from ANAC and Brazilian carriers, to benchmark and develop guidance on introducing a voluntary and nonpunitive state safety reporting program in Brazil. Compiled data indicated airline pilots and stakeholders are familiar with Brazil's current reporting system; interviewees also supported an improvement to current safety reporting effectiveness. ANAC's focus on responsive regulation encourages the regulated operators to comply with the rules and at the same time motivates them to continue acting correctly, Therefore, the researchers recommended updating the current Brazilian State voluntary reporting system, specifically using the U.S., Europe, and Australia as regulatory references. Finally, the program development and implementation should be executed in close coordination with the different industry stakeholders.

Keywords: Safety Management System, Aviation Safety Action Program, Safety Reporting

ADVERSE WEATHER LOW-PROBABILITY FORECAST EFFECTS ON FLIGHT FUEL PLANNING

Burak Cankaya[1], Peter O'Reilly[1], DPS, Diogo Umsza[2], Paulo Ricardo Lanzarini[2], Manoel Valente[2]
[1]Worldwide College of Business, Embry-Riddle Aeronautical University
[2]GOL

*** Corresponding author e-mail address**: bcankaya@erau.edu

PAPER ID: SIT162

ABSTRACT

The fuel amount carried on a flight is affected by several variables. One is the low probability weather forecast at the destination and how those probabilities should impact the amount of carried fuel. Predictions for the weather conditions at the airports are issued via Terminal Airdrome Forecast (TAF) messages. These reports contain several codes related to the various occurrence probabilities phenomena, but for this project, rain and storm were considered the main weather phenomena. The Flight Dispatcher, also known as the captain on the ground, is responsible for analyzing the weather condition information and, planning the flight, establishing the amount of carrying fuel. However, there is no standard for adding extra fuel when predicting adverse events caused delayed arrivals. It always happens subjectively as an interpretive factor in this judgment. The current procedure has ambiguity on the required amount of extra fuel when there is rain and storm low probability prediction. This study shows the examination results of additional fuel consumption with flight time increments. We considered a significant part of the adverse weather events; even if they have a low chance of occurring, we found an average of six additional minutes impact on destination arrivals. Our results demonstrate the need to observe this sort of low-probability weather forecast to define a model of additional fuel supply. We anticipate that, even if it is difficult to isolate all the variables that might affect a flight upon arrival, this could be a starting point for designing a fueling procedure under such circumstances. Furthermore, new practices that promote standardized supply tabulations can be found with a detailed retroactive analysis of each airline route.

Keywords: Flight Planning; Aircraft Fuel Planning; Mathematical Optimization; Brazilian Aviation Procedures.

References available on request.

INTER-DOM INTEGRATED TERMINALS- THE IMPACT ON AIRLINES' EFFICIENCY AND SAFETY

Peter O'Reilly, Lucas Bonfim, Nathalia Biao, Stephanie Douglas,
Embry-Riddle Aeronautical University, Azul Linhas Aéreas, Latam Linhas Aéreas

*** Corresponding author e-mail address**: oreillyp@erau.edu

PAPER ID: SIT163

ABSTRACT

Aviation safety and security involves balancing operational efficiency with the customer experiences from check-in to deplaning. Operational efficiencies in the passenger terminals are a must to maintain synchronized schedules to contribute to revenue margins. The strategic aircraft allocations on the terminals are vital to reduce the minimum connection time. Thus, the airport structure is essential to allocating aircraft to the right terminal and to the right positions allowing passengers to connect quickly to the next flight. This study assessed how implementing hybrid passenger terminals may improve operational efficiency while upholding the exceptional customer experiences. The gap between international recommendations such as United States and European operations were analyzed to better inform airport operations in Brazil. In this study, the analysis was conducted with a goal of promoting a more reliable and efficient operation in Brazil. Specifically, the study analyzed benefits from integrating domestic and international passengers in the same vicinity in an airport via the implementation of hybrid passenger terminals that combine domestic and international flights. It is believed this hybrid terminal approach will optimize the airport space and experience as well as improve operational efficiency and safety. To study the potential impact of hybrid terminals IATA, ICAO, and ANAC's perspective were used to understand the current regulations in Brazil. Then the United States model for airport terminals was included as a model along with European systems. The recommendations from the analysis found the need to consider a variety of stakeholder groups' perspectives in such a design and change. It is recommended a cost-benefit analysis be performed to then evaluate the redesign impact on the airport operations efficiency and revenues. The cost benefit analysis assists with studying the series of structural adaptations necessary that could be compensated by increasing the use of terminals and improving connection time by airlines. Findings also concluded that investment is needed into technologies to facilitate the sharing of passenger information between the airlines and government regulators to continually improve operational efficiency. From the analysis it is recommended the airport invest in additional screening options to expedite the security screenings while following international protocols in the hybrid terminals. Future studies are recommended to evaluate the effectiveness of the hybrid terminal designs implementation as to how it improved efficiency and its impact on revenue margins.

Keywords: Hybrid Terminal, Support Operations, Passenger Terminals

THE IMPACT OF UNSCHEDULED MAINTENANCE TO AN AIRLINE'S ON TIME PERFORMANCE

Peter O'Reilly*, Augusto Dalazen*, Beatriz Ponzoni**,Giovanna Simoes***, Burak Cankaya*

*Embry-Riddle Aeronautical University
**Azul Linhas Aéreas
***Latam Airlines
*** Corresponding author e-mail address**: oreillyp@erau.edu

PAPER ID: SIT164

ABSTRACT

During the taxi-out phase of a flight, the pilots might find different potential malfunctions. There are multiple methods to address these malfunctions. One approach is to have pilots perform the proper maintenance dispatch of an inoperative item, known as Crew Applied MEL dispatch. That dispatch procedure must be made under an aircraft's manuals and coordinated with the airline's maintenance control center. However, unlike European and American agencies, the Brazilian regulatory agency currently lacks the proper regulation to support the application of this Crew Applied MEL procedure. In this study, we have statistically presented the outcomes of this procedure change and the impact that these malfunctions might have on an airline's "on-time performance". Our study showed that this proposed procedure could be safely utilized with little or no direct costs related to the implementation. This research study also revealed that with proper implementation of this dispatch system, significant time could be saved while diminishing any losses to an airline's performance and brand image. It can enhance customers' loyalty as well. We believe this new procedure can improve the synergy between pilots and airlines, reduce flight delays, cut costs, and improve flight safety.

Keywords: Flight Planning, Unscheduled Maintenance, Brazilian Aviation Procedures

PROCEEDINGS



SITRAER 2022
Air Transportation Symposium

