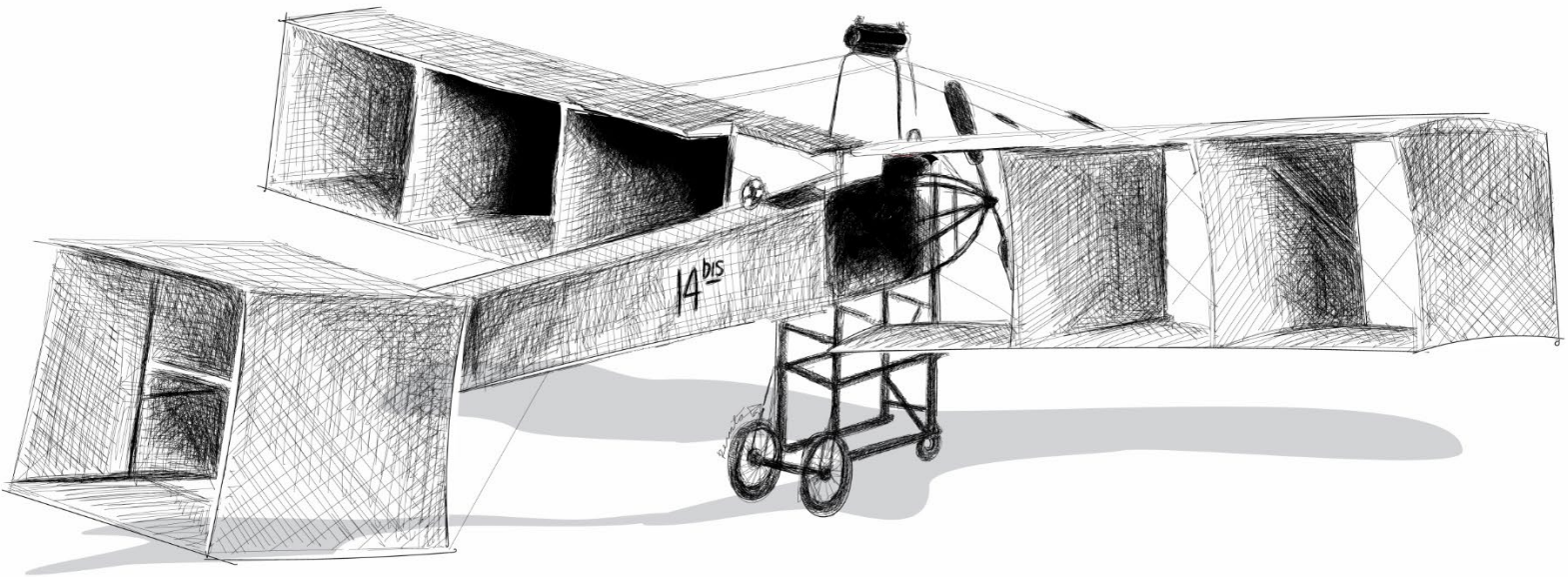
XX SITRAER
AIR TRANSPORTATION SYMPOSIUM

PROCEEDINGS

OCTOBER 18TH - 20TH 2023

EDITORS
RENATA CAVION
RAFAEL GIGENA CUENCA



SBTA
scientia via lucis

UFSC
Joinville

CAPES

AIR TRANSPORTATION SYMPOSIUM
XX
SITRAER
UFSC
2023

PROCEEDINGS OF XX SITRAER – AIR TRANSPORTATION SIMPOSYUM

ANAIS DO XX SITRAER – SIMPÓSIO DE TRANSPORTE AÉREO

Edited by Renata Cavion and Rafael Gigena Cuenca.

The content 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. All artworks are copyright protected by Renata Cavion. These images may not be used or edited in any manner or form without express written permission from the author.

Simpósio de Transporte Aéreo / XX SITRAER Proceedings. 20 (2023). Joinville, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

561p.

Anual

Disponível em: https://sitraer2023.joinville.ufsc.br/

ISSN: 2448-1912

1. Transporte aéreo (Congressos); I. Cavion, Renata; II. Cuenca, Rafael G.; III. Universidade Federal de Santa Catarina.

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

In 2023, the XX SITRAER was held in the city of Joinville from October 18 to 20. Joinville is the largest city in the state of Santa Catarina in southern Brazil and is located in the center of a highly industrialized and well-developed area in the north and northeast of the state. Joinville's metropolitan area is home to nearly 1.3 million people. It has shown impressive economic growth rates in the past decade due to its proximity to major ports and a well-educated workforce. Joinville's metropolitan area is projected to be among the 15 most important Brazilian economic areas.

The XX SITRAER was hosted by **Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)**, whose community consists of about 50,000 people, including approximately 6,000 faculty and staff members. The university has nearly 30,000 undergraduate students enrolled in more than 100 on-campus programs and 10 distance learning programs. At the graduate level, UFSC offers about 11,000 seats in over 60 academic master's degree programs, 15 professional master's degree programs, and 50 Ph.D. programs, in addition to a number of certificate programs offered on campus or through distance learning.

XX SITRAER

ORGANIZING COMMITTEE

SBTA - Brazilian Air Transport Reseach Society 2022/2025

Giovanna Miceli Ronzani Borille ✈ President
Rogéria de Arantes Gomes ✈ Vice President

Local Committee

UFSC – Federal University of Santa Catarina

Renata Cavion ✈ General Chair
Rafael Gigena Cuenca ✈ Scientific Chair

Cristiane Barbado
Andrea Holz Pfützenreuter
Mariane Duarte
Modesto Hurtado Ferrer
Diogo Nardelli Siebert
Anelize Borges Monteiro
Antônio Otaviano Dourado
Valeria Bennack
Christiane Wenk Fernandes
Marcelo Heidemann
Helry Luvillani Fontenele Dias

Scientific Committee

Symposium Topics	Topic Coordinator
Air Transportation Geopolitics	Rafael Gigena Cuenca
Aviation's environmental impacts	Rogéria de Arantes Gomes
Air Traffic Management	Marcelo Xavier Guterres
Airport Infrastructure	Mauro Caetano
Airlines Regulation and Management	Rafael Gigena Cuenca
Defense and Security	Fabiana S. de Arruda

Scientific Award Committee

Rafael Gigena Cuenca
Giovanna Miceli Ronzani Borille
Rogéria de Arantes Gomes
Marcelo Xavier Guterres
Mauro Caetano
Fabiana S. de Arruda

Revisors

Alessandro Soares de Freitas
ICEA

Alessandro V. M. Oliveira
ITA

Alexandre de Barros
University of Calgary

Arnaldo viana Jr
USP

Claudia Azevedo Pereira
ITA

Claudio Jorge Pinto Alves
ITA

Eduardo Luiz Machado
Unifesp

Evandro José da Silva
ITA

Fabiana Serra de Arruda
UNB

Francisco Heber Lacerda de Oliveira
UFC

Giovanna Miceli Ronzani Borille
ITA

Humberto Bettini
USP

Ítalo Romani de Oliveira
Boeing

Jean Phelipe de Oliveira Lima
ICEA

João Batista Camargo
POLI/USP

Jorge Miguel Reis Silva
UBI (Portugal)

José Alexandre Fregnani
ITA/Boeing

Luis Henrique Gonçalves Costa
UFERSA

Luiz Henrique Werneck de Oliveira
Zukunft Consultoria Ltda.

Marcelo Pereira Queiroz
ANAC

Marcelo Xavier Guterres
ITA

Marcus Vinicius do Nascimento
FATEC

Mauro Caetano
ITA

Michelle Galvão
UFG

Rogéria de Arantes Gomes
ITA

Viviane Adriano Falcao
Coventry University

Wilson Rocha Gomes
ITA

STAFF

Saulo Henrique Vasconcelos Novaes
Samuel dos Santos Amaral
Fernanda Cogo
Cler Carrobrez
Eloisa Goelzer Meinerz
Emilia Carvalho Peres
Esthefny Dall Alba
Fauzi Ali Bombarda Farhat
Felipe José Zanette
Gabriel Guilherme da Silva Lima
Gabriela Ramos
Gustavo Ruan Da Silva Pinto
Hans Herbert Schulz
João Gabriel Parnow
João Vítor Pereira Viana
Maria Eduarda Machado de Oliveira
Natália Xavier
Rodrigo Ignotti
Romis Antonio De Araujo Junior
Sarah Alves Valério de Oliveira
Victor Hugo Andrade Schlebinger
Vitória Régia Rosa Gaia
Angelica Baboghlian dos Santos
Vitor Rausch de Brito

LETTER FROM EDITORS

Throughout the 20 editions, SITRAER has provided opportunities for scientific contributions, promoting continuous dialogue between learning, research, and social, technological, economic, and environmental development in which it is possible to observe the direct influence of air transport.

SITRAER:

- has had more than 1,000 articles published;
- was hosted by 14 higher education institutions in 9 Brazilian states;
- reached the participation of more than 2,300 people;
- had the participation of more than 65 institutional representations (ranging from academic institutions to companies in the airline sector, members of regulatory agencies, among others, at national and international levels);
- offered more than 150 lectures from experts working in the air transport ecosystem.

The twentieth edition, hosted by the Federal University of Santa Catarina, occurred in a special time of facing and overcoming the challenges imposed by COVID-19, which was the biggest crisis in the aviation industry since the Second World War. It is also a time of reviewing economic regulations, reformulating public management in the sector, inserting private airport administrators, and witnessing mergers and acquisitions of airline companies and air mobility projects in urban skies.

This scenario intensifies the importance of debates on urgent topics aimed at finding solutions and paths for the gradual recovery of the airline sector, where SITRAER makes a special contribution.

In the 2023 Edition, 40% of the submitted articles were related to airport infrastructure issues, 30% focused on the challenges of air traffic management and 12% of the articles developed topics related to defense and security.

In this edition, we have the support of CAPES, making the Symposium financially viable and reinforcing SITRAER's commitment and mission to produce, systematize, and socialize scientific and technological knowledge.

The institutional support of our partners was also essential for the realization of this symposium, we are grateful to all of them.

In a year of celebration, which marks 150 years since the birth of Alberto Santos Dumont, the XX SITRAER was honored to pay tribute to the great Brazilian inventor and Air Brigadier.

We feel very honored to have hosted SITRAER 2023.

Renata Cavion
Rafael Gigena Cuenca

SPONSOR

CAPES

SUPPORTERS

DECEA

ANAC

ITA

FLORIPA AIRPORT

BOURBON Joinville Convention Hotel

ESCOLA DO TEATRO BOLSHOI NO BRASIL

INFRA S.A.

Azul

SITA

Associação Brasileira das Empresas Aéreas

FLYBIS

Prefeitura de Joinville | CULTURA E TURISMO | DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E INOVAÇÃO

Joinville e Região Convention & Visitors Bureau

ÁGORA TECH PARK

UDESC UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA | JOINVILLE CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS

ABMS Núcleo Regional Paraná/Santa Catarina

This page intentionally left blank.

CONTENTS

XX SITRAER..... 1

ORGANIZING COMMITTEE..... 2

LETTER FROM EDITORS..... 4

SPONSOR AND SUPPORTERS..... 5

SPEAKERS..... 9

DEBATE SESSIONS..... 27

PAPER AWARDS 35

PAPERS – TECHNICAL SESSIONS..... 39

LIST OF PAPERS 41

AIR TRAFFIC MANAGEMENT..... 45

AIR TRANSPORTATION GEOPOLITICS..... 197

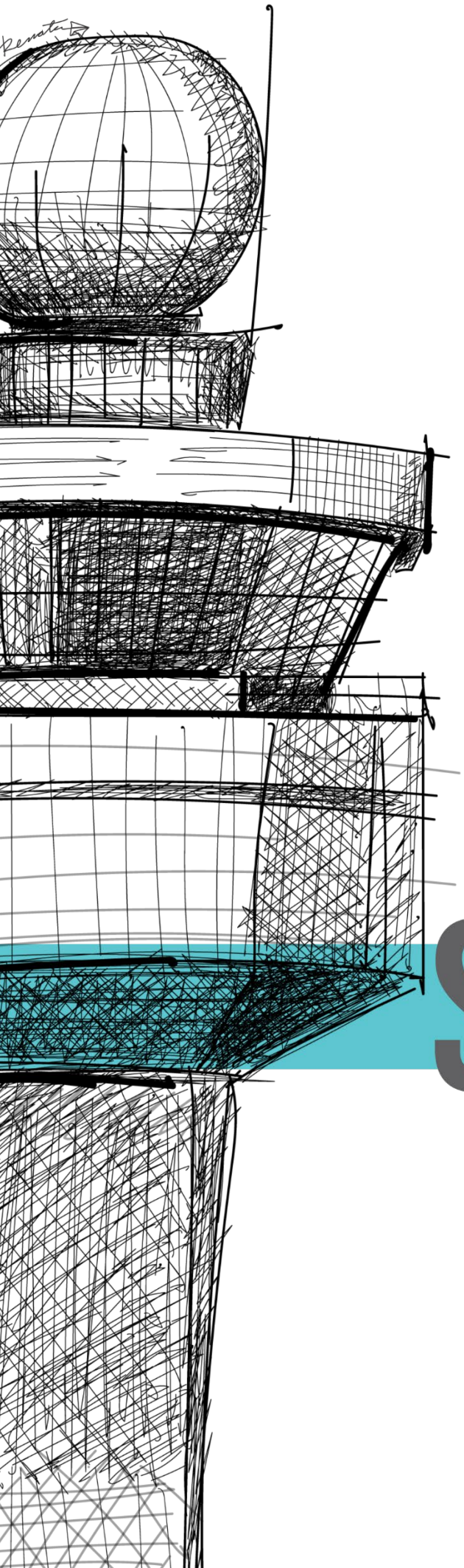
AIRLINES REGULATION AND MANAGEMENT..... 233

AIRPORT INFRASTRUCTURE..... 273

AVIATION´S ENVIRONMENTAL IMPACTS..... 475

DEFENSE AND SECURITY..... 503

This page intentionally left blank.



Alexandre de Barros
Amir Mattar Valente
Bernardo Tomaz de Castro
Carlos Alberto Bertotto
Cícero Filho
Fernando Daniel Di Mattia
Italo Romani
José dos Santos de Magalhães
Júlia Lopes Nascimento
Márcio André da Silva
Marcio Maffili
Milena Capeluppi
Ricardo Bisinotto Catanant
Rodrigo Costa
Rodrigo Florio Moser
Rogéria Arantes Gomes
Ronei Glanzman
Tiago Sousa Pereira

SPEAKERS

This page intentionally left blank.

Title

PANORAMA DA AVIAÇÃO CIVIL

Civil Aviation Overview

Speakers

Tiago Sousa Pereira; Ricardo Bisinotto Catanant; Bernardo Tomaz de Castro

Tiago Sousa Pereira

Director of ANAC (National Civil Aviation Agency), with a mandate until 2026. He served as Superintendent of Economic Regulation of Airports, Superintendent of Institutional Planning and Advisor to the Chief Executive Officer. He also worked at the Central Bank of Brazil and the Ministry of Planning, Development and Management.

Ricardo Bisinotto Catanant

Specialist in Civil Aviation Regulation, at ANAC, he served as Superintendent of Air Services Monitoring (SAS), as Superintendent of Economic Regulation and Market Monitoring, as Manager of Standards and Projects and as General Manager of Air Service Grants, in addition of Deputy Director.

Bernardo Tomaz de Castro

Civil Engineer graduated from the University of Brasília. Since 2010 he has worked as a specialist in civil aviation regulation at ANAC. He was Technical Information Management Manager (GTGI) of the Administration and Finance Superintendence (SAF). He currently holds the position of Operational Security Advisor.

Title

DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRANSPORTE AÉREO BRASILEIRO

Challenges for the development of brazilian air transport

MINISTÉRIO DE PORTOS E AEROPORTOS

GOVERNO FEDERAL BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

Speaker

Júlia Lopes Nascimento

Secretaria nacional de Aviação Civil

Chief of Staff of the National Civil Aviation Secretariat (04/2023 – currently). Monitors the Secretariat's projects and actions. Server and outsourced management. Monitoring and Ordering of Expenses of the National Civil Aviation Fund (FNAC). Analysis and preparation of various documents for internal and external bodies and interested parties. He has already worked in the Coordination of strategic projects of the Agency's Presidency. Preparation and negotiation of legislative proposals. Direct assistance to the Chief Executive Officer. Participation in the 6th and 7th Airport Concession Round.

Title

PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE AÉREO

Air Transport Planning

Speaker

José dos Santos de Magalhães

LabTrans®
Laboratório de Transportes e Logística

UFSC

Civil engineer with specialization in Aeronautical Engineering and Airpot Engineering. Expereince in airport planning and design, airport system planning and aircraft performance. Interested in airport planning, management and design, aircraft development and operations and project management.

Title

MERCADO BRASILEIRO DE TRANSPORTE AÉREO: OPORTUNIDADES E DESAFIOS NO PÓS-PANDEMIA

Brazilian air transport market:
Opportunities and challenges in the post-pandemic

Speaker

Ronei Glanzman

Former national secretary of civil aviation (2019-2023). Holds a postgraduate degree in macroeconomic assessment and a MBA degree in capital markets. Worked as economist at Brazilian Central Bank. From 2006 to 2011 worked at ANAC (Brazilian Civil Aviation Agency) as market monitoring and was the Brazilian member at ICAO statistics panel. Head of asset and grant at national secretary of civil aviation (2011/2017) and of department of regulation politics (2017/2019), leading the airport concession programme. From 2012 to 2016 was administration vice-president of Brasilia Airport consulate and member of Brazilian Senate Experts Group of the Brazilian Aeronautic Code (BAC) review.

Title

DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE AEROPORTOS REGIONAIS

Economic Development of Regional Airports

Speaker

Cícero Filho

Economist Cícero has a degree from the Federal University of Uberlândia (UFU), a master's degree in Aeronautical Civil Engineering from the Aeronautical Technological Institute (ITA) and is currently a doctoral student in applied economics at the University of Brasília. He has more than 10 years' experience in the transport economics sector, having worked at the Transport Economics, Antitrust and Regulation Center of the Aeronautics Technological Institute (NECTAR/ITA), Economic Monitoring Secretariat (SEAE) of the Ministry of Finance, National Transport Confederation (CNT), by the Planning and Logistics Company (EPL) and by INFRA S.A., a state-owned company linked to the Ministry of Transport.His experience is diverse in this area, covering transport planning, market analysis, composition and analysis of business costs, fleet management, economic regulation, industrial organization, empirical models, logistics systems, operational and management analysis of transport, and feasibility studies economic and financial sector focused on the transport sector.

Title

WORLD'S FIRST SUCCESSFUL INTERNATIONAL DTC AIR TRAVEL PILOT - ARUBA

Speaker

Rodrigo Costa

Rodrigo Costa has a degree in Information Systems, a Postgraduate in Business Management, an MBA from FGV. He develops innovative and disruptive businesses based on innovative biometrics solutions, covering all of Latin America, for the following areas: Facilitation of Passenger Flow at Airports; Automated Border Control; API / PNR – Advanced Passenger Information System.

Title

EXPANSÃO FUTURA E DESAFIOS DE INFRAESTRUTURA

Future expansion and infrastructure challenges

Speaker

Fernando Daniel Di Mattia

Aeronautical Scientist | Institutional Relations | Safety | Quality Assurance | Accident Investigator | Pilot | SMS | Risk Analysis.

Title

O CONHECIMENTO CIENTÍFICO NA EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE AÉREO

Scientific knowledge in the evolution of the air transport system

Speaker

Amir Mattar Valente

Amir Mattar Valente is Professor of the Postgraduate Program in Transport Engineering and Land Management PGTG at the Universidade Federal de Santa Catarina, researcher of Technological Development, CNPq level 2. He holds a degree in Civil Engineering from Universidade Federal de Santa Catarina (1979), a Master's degree in Transport Engineering from the Universidade Federal do Rio de Janeiro (1983) and a PhD in Production Engineering from the Universidade Federal de Santa Catarina (1994). Acts as a Transport Engineer with LabTrans on projects in collaboration with ANTT, the Ministry of Transport, DNIT, ANTAQ, SNP/MInfra and SAC/MInfra. As a researcher, he is the author of two books, several articles and scientific papers, has five patent registrations with the INPI and is a member of the technical staff of Revista da ANTT, member of the editorial board of Revista Gestão Industrial (online) and Revista Brasileira de Transportes (FGV), acts as a reviewer in the journals Revista Transporte Y Territorio, Revista Transportes, Revista Brasileira de Gestão Urbana and TRB – Transportation Research Board, in the areas of Transport Engineering and Logistics.

Title

SUSTAINABILITY CHALLENGES IN AVIATION: URBAN AIR MOBILITY AND LONG-HAUL

Speaker

Alexandre de Barros

UNIVERSITY OF CALGARY

Alexandre de Barros is Professor and Director of Civil Engineering Department at Calgary University, Canada. Holds a PhD in Transportation Engineering by Calgary University, Canada. Master's Degree in Transportation and Operational Research from Aeronautics Technology Institute – ITA. Bachelor Degree in Civil Engineering from Campinas State University (UNICAMP). Former Director of Airport Infrastructure at ANAC (Brazilian Civil Aviation Agency, 2008 – 2010), with relevant contributions in restructuring the Brazilian civil aviation system. Currently Associate Professor of Transportation Engineering at Calgary University, Canada; and also an editorial board member of Journal of Advanced Transportation. Has experience in the field of Transportation Engineering, with emphasis on Airports and Air Transport, acting mainly on the following topics: airport planning and design; air transport system planning; intelligent transport systems. Worked on several international airport projects, including Toronto/Pearson, Montreal/Trudeau, Atlanta, New York/JFK, Seattle/Tacoma, Boston/Logan, Leeds (Great-Britain), Hong Kong and Seoul/Incheon (South Korea).

Title

INVESTIMENTOS EM ESTUDOS E PROJETOS PARA AEROPORTOS

Investments in studies and projects for airports

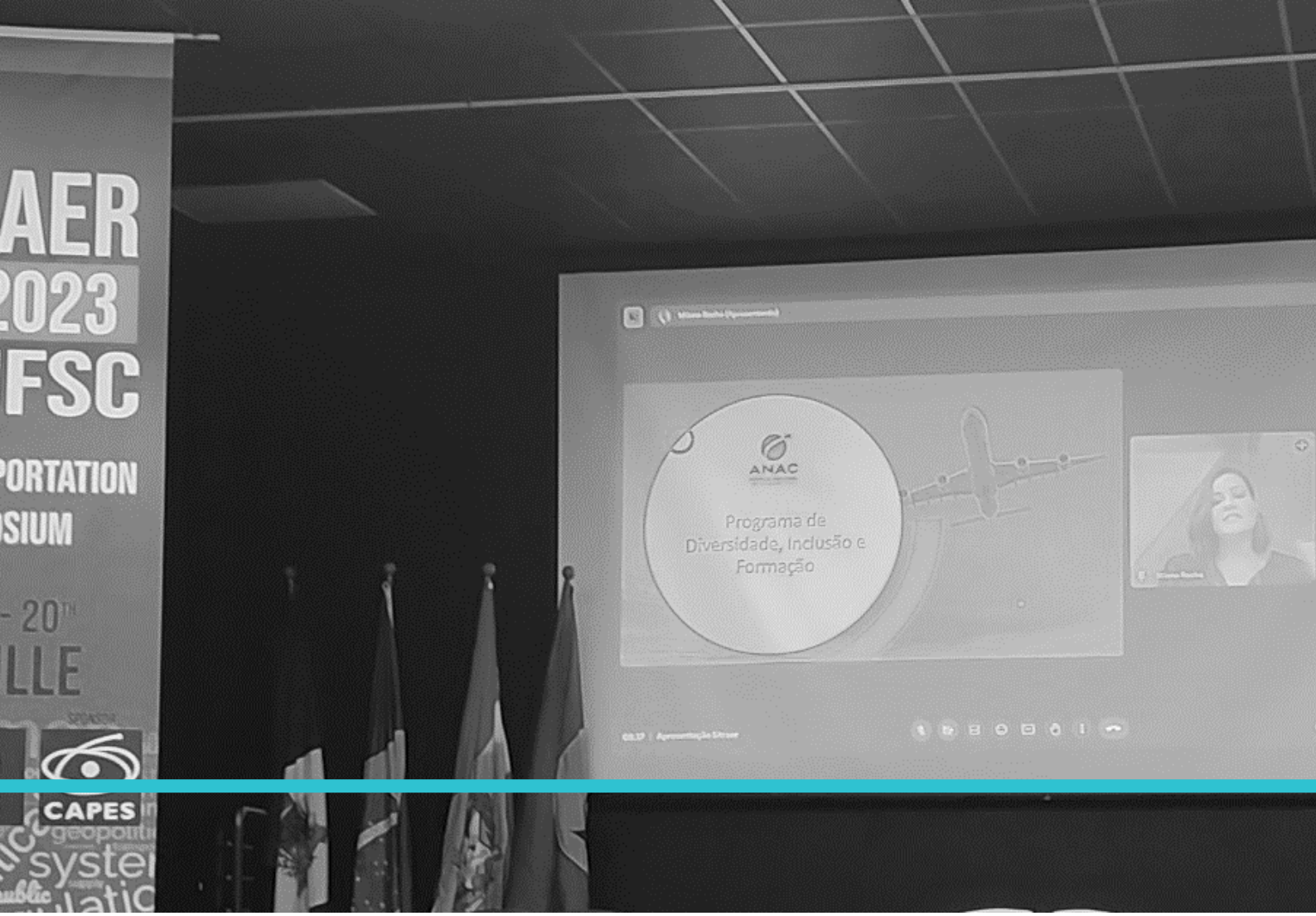
Speaker

Marcio Maffili

MINISTÉRIO DE PORTOS E AEROPORTOS

GOVERNO FEDERAL BRASIL UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

General Coordinator of Airport Projects of the Investment Department of the National Aviation Secretariat Civil Service of the Ministry of Infrastructure, Brasília/DF. Monitoring and coordination of investment planning in airport infrastructure regions throughout the country, including regarding the acceptance of terms of reference and projects. The area also establishes guidelines for the preparation of studies and projects, from prospecting new sites to preparing an executive project. Act also for the publication of guidance manuals for the sector and for SICRO's diagnosis with DNIT and FGV regarding possibility of its adoption for aerial mode. Between 2014 and 2019, responsible for evaluation and monitoring, in support for supervision, as well as guidelines, for Contract No. 11/2013, signed between SAC and Banco do Brasil, whose purpose was the preparation of studies and preliminary projects for 270 regional airports. Period from 07/11/2014 to date (considered the periods appointed in the positions of General Coordinator of Planning and General Coordinator of Studies and Projects, considering the maintenance of attributions, according to restructurings that occurred in the ministry during the period).



Title

PROGRAMA DE DIVERSIDADE, INCLUSÃO E FORMAÇÃO DA ANAC

ANAC diversity, inclusion and training program

Speaker

Milena Capeluppi

Specialist in Civil Aviation Regulation since 2013. At ANAC, he worked in coordinating the airport concession process, and was Service Quality Manager at the Airports Economic Regulation Superintendency. She was also an advisor to Director Tiago Pereira. Milena Capeluppi has a degree in Law, with a Master's degree in Transport from the University of Brasília. She also has certification in Economic Infrastructure Regulation from Embry-Riddle Aeronautical University, in partnership with PUC-RS.

Title

MUDANÇAS SOCIAIS NA AVIAÇÃO: COMPORTAMENTOS, PROCEDIMENTOS E OPERAÇÃO

Social changes in aviation: behaviors, procedures and operation

Speaker

Rogéria Arantes Gomes

Researcher, Postgraduate Professor at the Technological Institute of Aeronautics, with a degree in Economic Sciences, a master's degree and a doctorate in Air Transport and Airport Economics from the Technological Institute of Aeronautics. Vice-President of the Brazilian Society for Air Transport Research. Researcher at NIT - Transport Research Center (Portugal). Researcher at NECTAR - Center for Transport Economics, Antitrust and Regulation of the Technological Institute of Aeronautics. Researcher and consultant in the field of Economics, with an emphasis on Microeconomics, especially on the topics: regional and urban economy, transport economics; airports; externalities (aeronautical noise and emissions).

Title

ACESSO AO TRANSPORTE AÉREO: RIQUEZA, LUXO OU UMA QUESTÃO DE EDUCAÇÃO?

Access to air transport: wealth, luxury or a matter of education?

Speaker

Rodrigo Florio Moser

ANAC AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL

PhD student in Transport Engineering and Master from the Polytechnic School of the University of São Paulo (2001). Graduated in Civil Engineering from the same School (2007). Specialist in Civil Aviation Regulation at the National Civil Aviation Agency (ANAC), currently an advisor to the director (DIR/RC). Experienced professional in Transport Engineering, working with modeling and simulation of airport systems, planning, airport capacity and delay, airport concession and service quality, risk management and airport certification, including infrastructure, operations, maintenance, management systems operational security (SGSO), wildlife risk management and emergency response.

Title

BOEING RESEARCH & TECHNOLOGY: LEADING BOEING THROUGH A NEW ERA OF INNOVATION

Speaker

Italo Romani

Italo Romani de Oliveira holds a PhD (2007) and master's degree (2003) in Electrical Engineering from Polytechnic School of University of São Paulo, and a bachelor degree in Computer Sciences (1998) from Institute of Mathematics and Statistics of University of São Paulo. Founding member of Brazilian Society for Research in Air Transport and Senior Researcher at Boeing Research & Technology (Brazil), working Airspace Operational Efficiency field. Has experience in the areas of reliability and critical security of computer systems, performing assessments based on simulation models, formal methods and other software engineering techniques.

Title

UAM MOBILIDADE AÉREA URBANA

UAM Urban Air Mobility

Speaker

Márcio André da Silva

Manager of Project UAM - Urban Air Mobility. Specialist in Air Traffic Management, providing advice with emphasis on the areas PANS OPS, ATM and UAM. More than 20 years of experience in the aeronautical sector. Resilient profile in the search for solutions that provide optimization of means and resources. Ability to perform, organize, and manage teamwork locally or remotely. Disciplined and self-manageable. Critical analysis and planning capability. Direct participation in the planning of projects implementing the restructuring of Terminal Control Area (TMA) and Area Control Center (ACC). Experience providing instruction in the area of Instrument Flight Procedure according to the criteria in the ICAO documentation: Doc 8168, Doc 9905, Doc 9992, Doc 9613, Doc 4444, Annex 4, among others. Participation in national and international (ICAO) events such as the IFPP (Instrument Flight Procedure Panel) as well as in the SAM/IG group (SAM Implementation Group). Both participations as representative of Brazil.

Title

DESAFIOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRANSPORTE AÉREO BRASILEIRO

Speaker

Carlos Alberto Bertotto

FLYBIS

Carlos Alberto Bertoto is Pilot, Businessman and Computer Scientist. More than 25 years of experience in Executive Aviation and Commander of executive aircraft. Master's degree in Computer Science from UFRGS and MBA in Business Management from UNISINOS. Director and Founder of Brave Executive Aviation and is in charge of FlyBIS "Aeromobilidade", air mobility start-up. In partnership with Eve Air Mobility (first Embraer-X spin-off, Venture Builder and Embraer innovation agent), with support of Brave Aeronaves Executivos, it incorporates Advanced Air Mobility in Southern Brazil, planning to start operations in 2026 and to expand to other countries in Latin America, using 100% electric aircraft with zero emissions.

Debate Session 1

OPERATIONAL CHALLENGES FOR AIR TRANSPORTATION: WHAT'S COMING NEXT?

Debate Session 2

SCIENTIFIC STUDIES AND THE ADVANCE OF KNOWLEDGE IN THE AIR INDUSTRY

Debate Session 3

ARE AIRPORTS READY FOR THE FUTURE?

Debate Session 4

SOCIAL CHANGES OF AVIATION: BEHAVIORS, PROCEDURES, OPERATION

Debate Session 5

AIR TRAFFIC MANAGEMENT: CHALLENGES AMONG FLIGHTS IN URBAN SKIES

This page intentionally left blank.

OPERATIONAL CHALLENGES FOR AIR TRANSPORTATION: WHAT'S COMING NEXT?

Moderator:

Giovanna Miceli Ronzani Borille - ITA / SBTA

Participants:

Bernardo Tomaz de Castro - ANAC

Julia Lopes da Silva Nascimento - SAC

José Magalhães - LabTrans UFSC

SCIENTIFIC STUDIES AND THE ADVANCE OF KNOWLEDGE IN THE AIR INDUSTRY

Moderator:

Cláudio Jorge Alves Pinto - ITA

Participants:

Amir Valente - LabTrans / UFSC

Alexandre de Barros - Calgary University

Márcio Maffili - Ministério de Portos e Aeroportos

ARE AIRPORTS READY FOR THE FUTURE?

Moderator:

Viviane Falcão - Coventry University

Participants:

Ronei Glanzmann - SKJ Airpor

Rodrigo Costa - SITA

Cícero Filho - INFRA S.A.

Fernando Daniel Di Mattia – AZUL Linhas Aéreas

SOCIAL CHANGES OF AVIATION:

BEHAVIORS, PROCEDURES, OPERATION

Moderator:

Evandro José Silva – ITA

Participants:

Rogéria Arantes Gomes - ITA / SBTA

Rodrigo Florio Moser - ANAC

AIR TRAFFIC MANAGEMENT: CHALLENGES AMONG FLIGHTS IN URBAN SKIES

Moderator:

Mauro Caetano de Souza - ITA

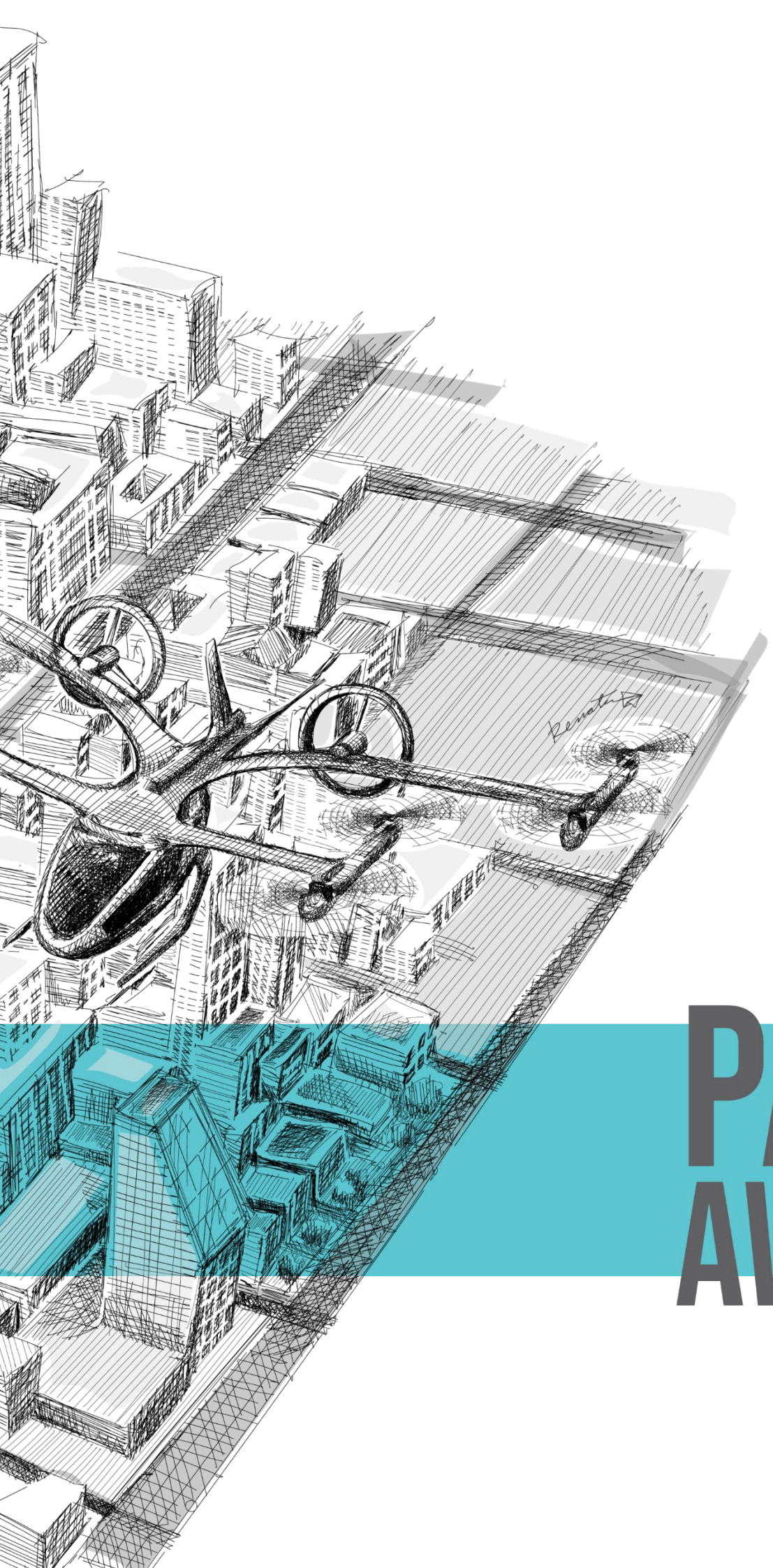
Participants:

Italo Romani – BOEING

Márcio André da Silva - CTA DECEA

Carlos Alberto Bertotto - FlyBis

This page intentionally left blank.



PAPER AWARDS

This page intentionally left blank.

• INNOVATION AWARD

Paper
TECHNOLOGY ROADMAP DEVELOPMENT PROCESS APPLIED IN AVIATION TRAINING

Authors
Guilherme Siqueira, Mauro Caetano and **Daniel Amaral**

• BEST PAPER AWARDS

1st Place

Paper
OBTENÇÃO DA ORIENTAÇÃO DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM POR MODELAGEM DE ANEMOGRAMA EM LINGUAGEM PYTHON

Authors
Antônio C. Hanig, John H. de Freitas, Michelle C. G. S. P. Bandeira and **João P. S. Lima**

2nd Place

Paper
TOWARDS OPTIMIZED AIRPORT SITE SELECTION WITH GEOMETRIC ANALYSIS

Authors
Vitor Silva Carvalho de Lyra and **Evandro José da Silva**

This page intentionally left blank.

PAPERS
TECHNICAL SESSIONS

This page intentionally left blank.

LIST OF PAPERS

AIR TRAFFIC MANAGEMENT

A REINFORCEMENT LEARNING APPROACH FOR OPTIMIZING THE RUNWAY CAPACITY UTILIZATION UNDER UNCERTAINTY 47
Lucas Orbolato Carvalho, Mayara Condé Rocha Murça, Marcelo Xavier Guterres

AIRCRAFT RECOVERY PROBLEM: IMPLEMENTATION OF A TIME BAND MODEL USING THE PYTHON-MIP LIBRARY. 57
João Victor Mendes Rocha

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE DESVIOS PARA RESOLUÇÃO DE CONFLITOS ENTRE EVTOL UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL 67
Cristiano P. Garcia, Li Weigang

APRENDIZADO DE MÁQUINA NÃO SUPERVISIONADO APLICADO À IDENTIFICAÇÃO DE SETORES DE ENTRADA EM ÁREA TERMINAL 71
Jean P. O. Lima, Pollyanne E. Silva, Alef G. Quintanilha and Andre L. E. Melo

CAPACIDADE DE PISTA DINÂMICA: FATORES A SEREM CONSIDERADOS NA METODOLOGIA BRASILEIRA 81
James Gomes Lima

EFICIÊNCIA DOS TERMINAIS DE CARGA AEROPORTUÁRIOS: UMA ANÁLISE CONSIDERANDO O E-COMMERCE 89
Wellington Luiz Rocha da Silva Filho, Viviane Adriano Falcão, Marcelo Xavier Guterres, João Basílio Tarelho Szenczuk

EVALUATING UNSTABLE APPROACHES SCENARIOS WITH THE SPECIFIC ENERGY METHOD: A BRAZILIAN AIRPORT STUDY 99
Leonardo Matoso de Abreu, José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani and Donizetti de Andrade

EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLIED TO ACTIVE RUNWAY CONFIGURATION AND DYNAMIC AIRPORT CAPACITY PREDICTION 113
Igor Galhano Gomes, Mayara Conde Rocha Murc e Marcelo Xavier Guterres

INFLUENCIA DA RECONFIGURACÃO DE PISTAS NA OCORRÊNCIA DE ESPERAS EM VOO: UM ESTUDO DE CASO NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS 125
Ivan M. da Silva, Alessandro S. de Freitas, Jean P. O. Lima, Pollyanne E. da Silva, Rafael De A. Almeida, Adriano D. da Silva and Andre L. E. Melo

OWNERSHIP AND OPERATIONAL COSTS OF EVTOL AIRCRAFT: A COMPREHENSIVE ANALYSIS. 131
Juliana de Oliveira Souza, Bruna Lorrane Jardim Ribeiro, Polliana Candida Oliveira Martins, Victor Rafael Rezende Celestino

PREVISÃO DA OCORRÊNCIA DE ATRASOS EM DECOLAGENS DO AEROPORTO DE GUARULHOS 137
Hélio da Silva Queiroz Júnior, Viviane Adriano Falcão, Francisco Gildemir Ferreira da Silva

PROPOSTA DE MODELO DE TREINAMENTO PARA PILOTOS NA FASE DE TRANSIÇÃO DE AERONAVES COMERCIAIS PARA MITIGAR CONFUSÃO DE MODOS DE CONTROLE DE TRAÇÃO 153
Anderson Matos de Castro, Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira

REAL-TIME MONITORING AND ALERTING OF MISSED APPROACHES FOR INCREASED SITUATION AWARENESS OF AIR TRAFFIC CONTROLLERS 165
Celso Luís do Couto Figueiredo, Mayara Condé Rocha Murça and José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani

SAFETY ASPECTS FOR THE DESIGN OF AUTOMATIC CONFLICT RESOLUTION IN TCAS 175
Maurício Spiazzi Richter, José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani, Donizeti de Andrade

STRUCTURED REINFORCEMENT LEARNING FOR AIR TRAFFIC FLOW MANAGEMENT 187
Patrice Zombré, Daniel Delahaye, Innocent O. Davidson, Rafael Lima de Carvalho, Felix Mora-Camino

AIR TRANSPORTATION GEOPOLITICS

A INFLUÊNCIA DO E-COMMERCE NA MOVIMENTAÇÃO DE CARGA AÉREA NO BRASIL 199
João Vitor de Alencar Amorim, Hélio da Silva Queiroz Júnior, Viviane Adriano Falcão, Daniel Lopes Nader de Azevedo

CHALLENGING NOISE CONTOURS AS AN EFFECTIVE MEANS FOR MANAGING AIRPORT NOISE CONFLICTS WITH COMMUNITIES: QUANTIFYING PEOPLE AFFECTED BY SÃO PAULO'S AIRPORTS 211
Luiz Henrique Werneck de Oliveira

TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS NO BRASIL: ACESSIBILIDADE E INTERMODALIDADE 223
Lucas Azeredo Rodrigues

AIRLINES REGULATION AND MANAGEMENT

ROTAS AÉREAS REGIONAIS SUBSIDIADAS PARA CONECTIVIDADE DE LOCALIDADES ISOLADAS NA AMAZÔNIA 235
Celso José Leão e Silva, Maurício Oliveira de Andrade, Viviane Adriano Falcão, Carlos Fabrício Assunção da Silva

SAFETY MANAGEMENT SYSTEM IN AERONAUTICAL MAINTENANCE: THE BRAZILIAN EXPERIENCE 243
Francis Ferronato, Pedro Paulo Andrade Júnior

SELECTION OF HIGH RISK CATEGORIES OF OCCURRENCES USING AN INTEGRATED MULTI-CRITERIA DECISION MAKING AHP-TOPSIS METHODOLOGY IN THE CONTEXT OF THE BRAZILIAN NATIONAL AVIATION SAFETY PLAN 253
Ronaldo Wajnberg Gamermann, Paulo Henrique Iengo Nakamura

TECHNOLOGY ROADMAP DEVELOPMENT PROCESS APPLIED IN AVIATION TRAINING 263
Guilherme de Carvalho Siqueira, Mauro Caetano, Daniel Capaldo Amaral

AIRPORT INFRASTRUCTURE

A NDEA MODEL TO EVALUATE AIRPORT EFFICIENCY TO GENERATE NON-AVIATION REVENUES: A CASE STUDY OF GUARULHOS INTERNATIONAL AIRPORT 275
Marcus Vinicius do Nascimento, Giovanna Miceli Ronzani Borille

ANÁLISE DO SETOR AEROPORTUÁRIO NA PERSPECTIVA DO PLANEJAMENTO LOGÍSTICO URBANO: UM ESTUDO DE CASO DA PLATAFORMA CEARÁ 2050 285
Fabiano Rocha, Giovanna Miceli Ronzani Borille

ANÁLISE OPERACIONAL E GERENCIAL DE AERÓDROMOS TIPO CONDOMÍNIO AERONÁUTICO 295
Maurício Antoniazzi, Daniel Corrêa de Carvalho Lery, Ivan Resende Leitão, Giovanna Miceli Ronzani Borille

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO CBR DO SUBLEITO PARA DIFERENTES AERONAVES 305
Lucas Cavalcante de Almeida, Antonia Fabiana Marques Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira, Mariana de Araújo Leite

AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS ATRAVÉS DO IRI E BBI 311
Livia Fortes Merighi, Aline Cacace, Fernando de Oliveira Fortes

AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM EM CAMADA POROSA DE ATRITO 319
Jefferson de Sousa Facó, Rayssa de Sousa Carneiro, Francisco Heber Lacerda de Oliveira

AVALIAÇÃO DE COEFICIENTE DE ATRITO EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM POR MEIO DE IMAGENS AÉREAS E REDES NEURAIS CONVOLUCIONAIS 329
Tiago Silveira de Andrade Aquino, Francisco Heber Lacerda de Oliveira, Gustavo Antonio Sousa Paz e Mota e Cesar Lincoln C. Mattos

BIM-BASED SUPERVISION METHODOLOGY FOR PROJECTS AND PUBLIC WORKS. CASE STUDY OF PROJECTS AND CONSTRUCTION EXECUTION FOR MODERNIZATION OF THE PASSENGER TERMINAL AT MONTES CLAROS AIRPORT - MG 339
Guilherme Cunha Guignone, Heurie Rocha, Vitor Hugo Rissotto, João Luiz Calmon

BUSINESS MODEL FOR PERNAMBUCO REGIONAL AVIATION 353
Marcos Araujo de Souza Celestino, Viviane Adriano Falção

DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO DE CANAL DE INSPEÇÃO DE PASSAGEIROS EM AEROPORTOS: UM ESTUDO DE CASO. 363
Wilson Rocha Gomes

EFFECTS OF AIRPORT MOVEMENTS ON TAXI-IN AND TAXI-OUT TIME 369
Alexandre Pinchemel, Mauro Caetano, Evandro José Silva

IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE QUALIDADE EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO AEROPORTUÁRIAS 379
Livia Fortes Merighi, Matheus Silva Oliveira, Claudia Azevedo Pereira, José Antonio Schiavon

INDONESIAN AIRPORT DESIGN AND CUSTOMER SATISFACTION 389
Tika Andyani Putri

INVESTIGATING RESILIENCE IN DYNAMIC PASSENGER HANDLING SYSTEMS: AN AGENT-BASED SIMULATION STUDY OF FUTURE AIRPORT TERMINALS 401
Luisa Wiebringhaus, Idoaldo Jose de Lima, Johannes Reichmuth

MODELING AND RESOURCES' OPTIMIZATION FOR PEOPLE PROCESSING IN SECURITY CHECKPOINTS OF BRAZILIAN AIRPORTS 411
Michelle Salgado Ferreira Arcúrio, Luiz Fernando de Abreu Pimenta, Bárbara Carvalho de Azevedo, Fabiana Serra de Arruda

MODELO PARA ANÁLISE DE PRÉ-VIABILIDADE DE AEROPORTO: O CASO DO AEROPORTO OSCAR LARANJEIRA - CARUARU-PE 421
Bárbara Mayane Alves Pereira, Viviane Falcão

OBTENÇÃO DA ORIENTAÇÃO DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM POR MODELAGEM DE ANEMOGRAMA EM LINGUAGEM PYTHON 431
Antônio Carlos Hanig, John Heberty de Freitas, Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira, João Paulo Silva Lima

SISTEMA DE DESACELERAÇÃO COM MATERIAIS PROJETADOS (EMAS) - IMPLANTAÇÃO E RISCOS 443
Mário Rueda Júnior, Rita Moura Fortes

SMALL AIRPORT PROJECT MANAGEMENT AND INNOVATION: A SCOPING REVIEW 453
Rômulo de Azevedo Gomes, Mauro Caetano

TOWARDS OPTIMIZED AIRPORT SITE SELECTION WITH GEOMETRIC ANALYSIS 465
Vitor Silva Carvalho de Lyra, Evandro José da Silva

AVIATION'S ENVIRONMENTAL IMPACTS

AIRLINES FLEETS RENEWAL FOR GLOBAL SUSTAINABILITY 477
H. Karam, E. Anwama, L. G. Zelaya Cruz, H. Alfazari, F. Krykhtine, F. Mora-Camino

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE AEROPORTOS BRASILEIROS CONCESSIONADOS – AMPLIANDO O PARADIGMA 483
Maria Cecília Domingos, Rogéria de Arantes Gomes, Viviane Adriano Falcão

MODELO DE ACIDENTE POR COLISÃO COM AVES EM AERONAVES COMERCIAIS 493
Bruna Borges Azevedo, Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira

DEFENSE AND SECURITY

AB-INITIO PILOT TRAINING MODEL COMBINATING SCENARIO-BASED TRAINING WITH SIMULATOR AND REAL FLIGHT 505
Marcello Tambosi Possebon, Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira

AÇÕES INTERAGÊNCIAS NA FISCALIZAÇÃO DO USO DOS DRONES NO BRASIL: CONSIDERAÇÕES À LUZ DO CÓDIGO BRASILEIRO DE AERONÁUTICA 513
Eduardo Araújo da Silva, Prof. Dr. Carlos Eduardo Valle Rosa

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CERTIFICATION APPROACHES OF FAA AND EASA FOR THE VTOL AIRCRAFT 523
Maurício Antoniazzi, Daniel Corrêa de Carvalho Lery, Ivan Resende Leitão, Marcelo Soares Leão, Cristiane Aparecida Martins

COMPARING THE PERFORMANCE OF DIFFERENT VERTIPORT TOPOLOGIES USING DISCRETE EVENT SIMULATION 533
Eva Feldhoff, Giovanna Miceli Ronzani Borille, Johannes Reichmuth

HELIPAD CONNECTIVITY AS VERTIPORTS AND THE POTENTIAL OF PUBLIC INTRA-URBAN AND INTER-URBAN AIR TRANSPORTATION FOR ADVANCED AIR MOBILITY 543
Peter Targino Klein, Mauro Caetano

INCORPORATING DRONE'S NO-FLY ZONES IN TRAVELING SALESMAN PROBLEM: A CASE STUDY IN FLORIANOPOLIS 553
Bruno Avelino, Mauro Caetano, Christopher Cerqueira

AIR TRAFFIC MANAGEMENT

Air Traffic Management aims to ensure the safe and efficient flow of air traffic. In the symposium, the papers involved knowledge related to Aeronautical Information, Safety and Reliability, Human Resources, for example. A total of 15 papers were presented during the XX Sitraer, with great participation of women as authors in that technical section, most of them from the Brazilian southeast region, especially from ITA (Aeronautical Institute of Technology), but from other regions too, like Center West and Northeast. Some authors are from foreign countries, like France and South Africa.

This page intentionally left blank.

A REINFORCEMENT LEARNING APPROACH FOR OPTIMIZING THE RUNWAY CAPACITY UTILIZATION UNDER UNCERTAINTY

Lucas Orbolato Carvalho*, Mayara Conde Rocha Murça, Marcelo Xavier Guterres
Instituto Tecnologico de Aeronáutica (ITA)

*** Corresponding author e-mail address:** orbolato@ita.br

PAPER ID: SIT2181

ABSTRACT

In the air traffic management (ATM) field, uncertainty is everywhere, since air transport activities are subject to intrinsically uncertain parameters, like passengers' demand for flights, operational instabilities and capacity constraints. However, it is not always noticed or properly considered when dealt with. Hence, although many studies have tried to include this factor in the problems' formulations, there is not an ultimate and unquestionable approach to do so in most, if not all, of the cases. Thus, this study brings a new way to introduce uncertainty in a primary ATM problem: runway capacity utilization. Even though this subject was widely explored over the years, the prevailing methods are still deterministic, and those who tried a stochastic formulation focused on trying to model the problem's behavior and solving it with dynamic programming. Nonetheless, this way of facing it is subject to high dimensionality and modeling limitations. Both issues can be eliminated with direct reinforcement learning methods. This tool is able to learn by experience within uncertain and unknown environments. So, a Q-Learning tabular method with Eligibility Traces and a decaying-epsilon-greedy value-based policy is employed to solve the problem for a given runway configuration with two capacity envelopes for different weather conditions. Dynamic storage of states and actions is also proposed to reduce the problem's dimensionality. With this framework, the agent could learn the optimal policy fast and without trouble, allowing the air traffic managers to define the best actions in advance in a real situation. Unlike linear and dynamic programming methods, another important upside of this approach is its flexibility, making it possible to easily change the environment or the reward function. Future improvements can be made by introducing regression models to generalize the learning process and expanding the problem to different runway configurations

Keywords: Air Traffic Management, Runway Capacity, Uncertainty, Reinforcement Learning, Optimization.

1. INTRODUCTION

Any solution to an air transport problem that considers it to be stationary and predictable is guaranteed to fail someday, even if the findings look promising for specific circumstances since airport and air traffic operations hold various uncertainty elements with multiple and dynamic uncertainty degrees. Thus, when it is most essential, that is, when the conditions are most chaotic, a strategy or mathematical model that is deemed to be successful may not attain its intended purposes. It applies to the problem faced by this study, given that the runway capacity is subject to weather uncertainty, which cannot be predicted for sure in advance, and its future development may affect the current decision because it may be better to prioritize arrivals or departures if it is known that they are going to be restricted or released in the following minutes or hours.

Therefore, the primary goal of this work is to suggest a novel and effective solution to the problem of maximizing airport capacity utilization that considers the capacity uncertainty due to the weather condition, comparing the results with the traditional nonlinear programming models operating in real time. So, the problem can be stated as follows: *how many arrivals u_t and departures v_t should be admitted at each time step $t \in \{1,2,...,T\}$ in order to minimize the total delay, given the arrival and departure queues, a_t and d_t, and demands, $\tilde{a}_t$ and $\tilde{d}_t$, respectively, as well as the runway capacity constraints, and knowing that the weather condition may change in the future with some probability estimate?*

So, the problem has the weather condition as one of its inputs. For a given runway configuration, it is basically divided into two possibilities: a visual meteorological condition (VMC) or an instrumental meteorological condition (IMC), where the former is less restrictive than the latter. Each of these conditions has a corresponding capacity constraint, expressed by a curve that represents a trade-off between arrivals and departures. This curve is generally referred to as runway configuration capacity envelope (RCCE), and it is usually expressed by a piece-wise linear convex function obtained from historical data (Gilbo, 1993, 1997). An example of RCCE, and the one used in this study, is that presented in Figure 1, provided in Gilbo (1997). Hence, for each weather condition, there is a different capacity constraint, that must also be considered as an input of the problem. Besides, for each time step t of the time frame analyzed, there is a transition probability estimate between VMC and IMC, representing the weather uncertainty.

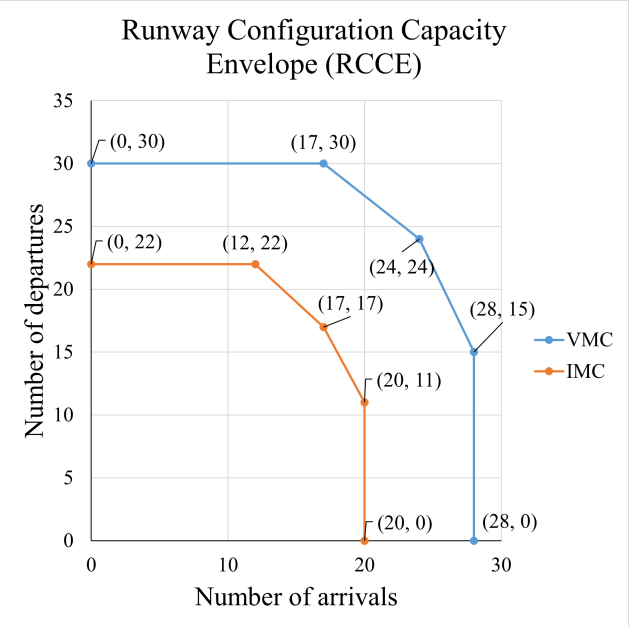


Figure 1 Example of RCCEs for IMC and VMC given a fixed runway configuration (Gilbo, 1997).

Regarding demand, the problem receives as inputs the initial queues a_0 and d_0 as well as the demand over time $\tilde{a}_t$ and $\tilde{d}_t$ for arrivals and departures, respectively. These values can be considered as deterministic since arrivals and departures are determined in advance during the flight scheduling. So, the uncertainty associated with the passengers' demand for flights had already been eliminated in previous steps.

There are several studies that investigate different optimization methods on the topic, ranging from deterministic (Gilbo, 1993, 1997; Dell'Olmo & Lulli, 2003) to stochastic models (Teodorovic et al., 2004; Jacquillat & Odoni, 2015; Jacquillat et al., 2016; Jacquillat & Odoni, 2018; Shone et al., 2019, 2021). In Shone et al. (2021), the authors conducted a deep literature review on stochastic modeling for air transport problems, describing in detail the studies focused on the current subject until that moment. Moreover, the most recent studies dealing with this problem formulate it as a Markov Decision Process (MDP) (Jacquillat et al., 2016; Shone et al.,

2019), which can be solved by dynamic programming, like it was done, or direct reinforcement learning. The former, as a model-based method, requires a model of the environment, which is susceptible to being wrong, and it also requires every state and action to be tested, whereas the latter is a model-free method and exempts visiting all states and actions. So, direct reinforcement learning can improve the learning process, ensuring the convergence to a really optimal policy, since there are no assumptions about the environment's behavior, and accelerating it due to its sampling structure.

2. LITERATURE REVIEW

This problem was first addressed in Gilbo (1993). In this study, it was formulated and solved as a usual optimization problem, with an objective function subject to a set of constraints, considering the weather condition as deterministic. Its direct formulation is nonlinear and aims to minimize the total queue for a given time frame subject to a single capacity envelope. Mathematically, it can be defined as follows Gilbo (1993):

$$\min_{u^*} \sum_{i=1}^{N} \gamma_i \left[\alpha_i X_{i+1} + (1-\alpha_i) Y_{i+1}\right], \alpha_i \in [0;1]$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} X_i \geq 0, & \forall i \\ Y_i \geq 0 & \forall i \\ 0 \leq v_i \leq D_i, & \forall i \\ v_i + g_{ji} u_i \leq b_{ji}, & \forall i, j \\ 0 \leq u_i \leq B_i, & \forall i \end{cases}$$

with

$$X_{i+1} = X_i + a_i - u_i, \forall i$$
$$Y_{i+1} = Y_i + d_i - v_i, \forall i$$

where X_i and Y_i are the arrival and departure queues, a_i and d_i are the arrival and departure demands, u_i and v_i are the arrival and departure service rates or capacity allocation, D_i, B_i, g_{ij} and b_{ij} are the parameters of the capacity curve, α_i is the arrival priority, and γ_i is the time step priority, all at the i-th time step.

As mentioned, this formulation is nonlinear, but it can be easily linearized with minor algebraic manipulations using the relationship between queues and service rates, leading to the following problem Gilbo (1993):

$$\max_{u^*} \sum_{i=1}^{N} \sum_{p=i}^{N} \gamma_p \left[\alpha_p u_i + (1-\alpha_p) v_i\right], \alpha_p \in [0;1]$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} \sum_{p=1}^{i} u_p \leq X_1 + \sum_{p=1}^{i} a_p, & \forall i \\ \sum_{p=1}^{i} v_p \leq Y_1 + \sum_{p=1}^{i} d_p, & \forall i \\ 0 \leq v_i \leq D_i, & \forall i \\ v_i + g_{ji} u_i \leq b_{ji}, & \forall i, j \\ 0 \leq u_i \leq B_i, & \forall i \end{cases}$$

This approach is still widely used and a reference for other studies on the theme, being attractive due to its simplicity. However, it has some strong limitations: it is deterministic, stationary, and restricted to linear functions. In Gilbo (1997), it was generalized to include the terminal maneuvering area (TMA) capacity, associated with the capacity of the arrival and departure fixes. In the same study, different capacity envelopes related to the weather condition were also recognized, but nothing was done to account for its uncertainty. An attempt to address this limitation was later made by Teodorovic et al. (2004) using a fuzzy optimization method to represent the capacity uncertainty. Despite that, it was not associated with the weather condition, and the model relied on parameters estimated by experience. Moreover, it is not common to consider the TMA capacity as a reference, because it is dynamic, more complex, and usually less restrictive than the runway capacity.

The greatest challenge in the problem is how to take uncertainty into account. This issue and the intrinsic limitations of airport capacity utilization led also to the proposal of Ground Delay Programs by Hall (1999) and Gilbo & Howard (2000), in order to act upon the demand side instead of the capacity side. Nevertheless, the first study that provided a significant contribution toward this goal was Dell'Olmo & Lulli (2003). In this study, even though the authors did not introduce uncertainty in their model, they opened the doors for it by formulating the problem as an MDP, which also eliminates one of the main limitations of the traditional method of Gilbo (1993) by allowing nonlinear functions. In Dell'Olmo & Lulli (2003), the authors proposed a dynamic programming method to solve the problem as an MDP, considering it deterministic and stationary. So, the environment states are defined by the cumulative demand $z_t = (a_t, d_t)$, such that:

$$z_{t+1} = z_t + \left(\tilde{a}_{t+1}, \tilde{d}_{t+1}\right) - (u_a(t+1), u_d(t+1))$$

where $a_t \in [0; \sum_{k=1}^{t} \tilde{a_k}]$ and $d_t \in \left[0; \sum_{k=1}^{t} \tilde{d_k}\right]$, $z_1 = (\tilde{a}_1, \tilde{d}_1)$, $\left(\tilde{a}_t, \tilde{d}_t\right)$ is the immediate demand, and $u(t) = (u_a(t), u_d(t))$ is the service rate.

Unlike Gilbo (1993), the fairness principle of first-in-first-out (FIFO) was considered in the demand serving and introduced into the objective function to express the cumulative delay, instead of the total queue. Therefore, the objective function is given by the sum of the marginal delay increments $\Delta_t(a_t)$ and $\Delta_t(d_t)$, which include a fairness factor, resulting in the following mathematical expression:

$$\sum_{t \in \mathscr{T}} \left[\Delta_t\left(a_t\right) + \Delta_t\left(d_t\right)\right]$$

So, the cost function of the MDP can be defined as follows:

$$r(z_t, u_t) = \Delta_t\left(a_t\right) + \Delta_t\left(d_t\right)$$

With this dynamic programming procedure, there is no need for a piece-wise linear convex capacity curve. Nonetheless, if it is linear, the problem may also be modeled and solved with linear programming:

$$\min_{u^*} \sum_{t \in \mathscr{T}} \left[\Delta\left(a_t\right) + \Delta\left(d_t\right)\right]$$

Subject to

$$\begin{gathered}\alpha_{i,t}\left(d_{t-1} + \tilde{d}_t - d_t\right) \\ +\beta_{i,t}\left(a_{t-1} + \tilde{a}_t - a_t\right) \leq \gamma_{i,t}, \forall t \in \mathscr{T}, \forall i \in \mathscr{I}_t\end{gathered}$$

$$d_{t+1} \leq d_t + \tilde{d}_{t+1}, \forall t \in \mathscr{T}$$

$$a_{t+1} \leq a_t + \tilde{a}_{t+1}, \forall t \in \mathscr{T}$$

$$d_t, a_t \in \mathbb{N}, \forall t \in \mathscr{T}$$

However, despite the MDP representation of the problem and the new objective function interpretation, it is still a deterministic model. Thus, in Jacquillat & Odoni (2015) and Jacquillat et al. (2016), an effort was made to overcome this limitation by associating the MDP formulation with Markov chains and introducing stochastic parameters in the environment states. Furthermore, the objective function was simplified to represent delays in terms of queues, resulting in the following cost function:

$$\alpha \sum_{t=1}^{T} a_t^2 + \sum_{t=1}^{T} d_t^2, \alpha \geq 1$$

The environment state, at a time step t, is represented by a 5-tuple $S_t = (a_t, d_t, RC_t, wc_t, ws_t)$, such that a_t and d_t are the service rates, RC_t is the runway configuration, $wc_t \in \{VMC, IMC\}$ is the weather condition, and ws_t is the wind state, affecting the possible runway configurations. The environment's behavior is modeled with Markov chains, with a transition probability between VMC and IMC. In Jacquillat & Odoni (2018), the investigation of the runway configuration selection problem was deepened. Moreover, Shone et al. (2019) suggested improvements to the dynamic programming model of Jacquillat et al. (2016) by making some adjustments to the Markov chains and introducing a new term in the objective function to account for the cost of switching the service rates as follows:

$$\sum_{t=1}^{T} \left(\alpha a_t^2 + d_t^2\right) + \sum_{t=2}^{T} \left[k \Delta t \left(u_t - u_{t-1}\right)^2\right]$$

Despite the contributions to filling the existing gaps in the previous studies, providing a solution capable of dealing with weather uncertainty, nonlinear functions and nonstationarity, the dynamic programming approach relies on a model of the environment. So, its solution is likely to be wrong if the model does not represent the environment properly. Furthermore, any change in the problem, such as the introduction of new parameters in the environment state representation, may require changes in the model. On the other hand, direct reinforcement learning enables a faster and more adaptive solution because it does not need a model of the environment and allows the agent to learn directly from experience (Sutton & Barto, 2018). Therefore, this study intends to solve the problem of runway capacity allocation for a fixed runway configuration, by using reinforcement learning and comparing it to a real-time nonlinear programming solution as a benchmark.

3. METHODOLOGY

3.1. Dataset

Due to the lack of public data, the data provided in Gilbo (1997) were used in this study to test the proposed method. The arrival and departure demands are presented in Table 1, and the RCCEs, in Figure 1. A priority of arrivals α of 2 was considered in the tests. Besides, a normal probability distribution of occurring an IMC was arbitrarily considered just for illustration, representing the weather prediction.

Table 1 Data used to generate the results (Gilbo, 1997).

t	Time	Demand		IMC Probability
		Arrival (a_t)	Departure (d_t)	
1	16:45-17:00	26	36	0,66%
2	17:00-17:15	38	32	1,71%
3	17:15-17:30	42	9	3,93%
4	17:30-17:45	29	15	8,10%
5	17:45-18:00	6	7	14,92%
6	18:00-18:15	13	10	24,60%
7	18:15-18:30	14	17	36,30%
8	18:30-18:45	20	33	47,92%
9	18:45-19:00	40	34	56,61%
10	19:00-19:15	25	22	59,84%
11	19:15-19:30	13	13	56,61%
12	19:30-19:45	12	1	47,92%
	Total	278	229	

3.2. Reinforcement Learning Algorithm

Reinforcement Learning (RL) is a Machine Learning paradigm used to solve problems that can be formulated as a Markov Decision Process (MDP). This type of process is characterized by the sequential decision-making of an agent in constant interaction with an environment based on its reactions to his actions. This process is represented in Figure 2. One can see that the environment reacts to the agent's action A_t returning a reward R_{t+1} and switching its state from S_t to S_{t+1}. From the reward obtained and the new state, the agent takes then a new action, following a certain policy, which improves over time along the learning process. So, the process runs on a step-by-step basis, following the Markov property, which states that the environment's next state depends only on the previous state and the agent's action.

The main goal of reinforcement learning is to learn a policy that maps each state to an optimal action, which corresponds to the action that leads to the greatest return in the long run, that is, the highest amount of rewards accumulated over time. This policy is called optimal policy, and it is achieved by improving the initial policy based on the estimated value of each action for every possible state. To do so, the algorithms must estimate the values of each state-action pair, calculating the future rewards and bringing them to present value. This problem of finding the optimal policy is called the control problem and is the central problem of reinforcement learning.

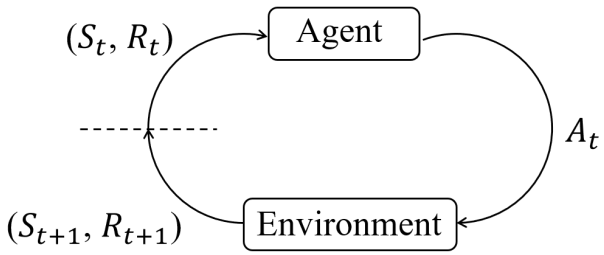


Figure 2 Markov Decision Process.

There are several RL algorithms to face this problem, but temporal-difference learning with eligibility traces unifies the advantages of different methods, enabling an incremental learning process of state-action values without an explicit policy function and with a sampling procedure derived from the Monte Carlo method that reduces the problem's dimensionality (Sutton & Barto, 2018). Thus, this type of algorithm is used in this study, specifically, the Q(λ) version Sutton & Barto (2018), and its pseudo-code, applied to the current problem, is represented in Algorithm 1. The algorithm calculates the state-action pairs' value function $Q(s,a)$, for all (s,a) visited during its execution. So, with the function $Q(s,a)$ the optimal action $a^*(s)$ for a state s can be obtained simply by taking $a^*(s) = \text{argmax}_a Q(s,a)$.

3.3. Parameters, functions and implementation details

This is a tabular solution method since it works with discrete finite states. So, the state features must fit this requirement. Hence, in the current problem, the environment's states are defined by a tuple $S_t = (wc_t, a_t, d_t, t)$, where $wc_t \in \{VMC, IMC\}$ is the weather condition, a_t and d_t are the arrival and departure queues, respectively, and t is the period, representing a one-way correspondence between IMC probability and time evolution.

Algorithm 1 Q(λ) for runway capacity allocation optimization

Input: $f_{VMC}, f_{IMC}, \alpha, a_0, d_0, \left[\tilde{a}_t, \tilde{d}_t, p_t^{IMC}\right], t = 1,\ldots,T$

Initialize all parameters: step-size parameter (κ), discount rate (γ), eligibility trace decay rate (λ), initial epsilon ε_i, final epsilon ε_f, epsilon-decay mode and number of episodes
for each episode **do**
  $t \leftarrow 0$
  $a_t \leftarrow a_0 + \tilde{a}_t$
  $d_t \leftarrow d_0 + \tilde{d}_t$
  $wc_t \leftarrow \text{rand}\left([0,1], p = \left[1 - p_t^{IMC}, p_t^{IMC}\right]\right)$
    ▷ '0' stands for VMC and '1' for IMC
  $S \leftarrow (wc_t, a_t, d_t, t)$
  if S was not visited yet **then**
    Store S
    Initialize all $A(S) \leftarrow [u_t, v_t]$, such that (u_t, v_t) is on the capacity envelope and $u_t \leq a_t$ and $v_t \leq d_t$
    Initialize all $Q(S,A) \leftarrow -\left[\alpha\,(a_t - u_t)^2 + (d_t - v_t)^2\right]$
    Initialize all $E(S,A) \leftarrow 0$
  end if
  Take ε-greedy action $A = [u_t, v_t]$ based on Q values
  Observe the reward $R \leftarrow -\left[\alpha\,(a_t - u_t)^2 + (d_t - v_t)^2\right]$
  $t \leftarrow t + 1$
  while $t < T$ **do**
    $a_t \leftarrow a_t + \tilde{a}_t - u_t$
    $d_t \leftarrow d_t + \tilde{d}_t - v_t$
    $wc_t \leftarrow \text{rand}\left([0,1], p = \left[1 - p_t^{IMC}, p_t^{IMC}\right]\right)$
    $S' \leftarrow (wc_t, a_t, d_t, t)$
    if S' was not visited yet **then**
      Store S'
      Initialize all $A'(S') \leftarrow [u_t, v_t]$, such that (u_t, v_t) is on the capacity envelope and $u_t \leq a_t$ and $v_t \leq d_t$
      Initialize all $Q(S',A') \leftarrow -\left[\alpha\,(a_t - u_t)^2 + (d_t - v_t)^2\right]$
      Initialize all $E(S',A') \leftarrow 0$
    end if
    Take ε-greedy action $A' = [u_t, v_t]$ based on Q values
    Observe the reward $R' \leftarrow -\left[\alpha\,(a_t - u_t)^2 + (d_t - v_t)^2\right]$

Algorithm 1 (continued)

    $A^* \leftarrow \text{argmax}_a Q(S',a)$
    if $Q(S',A^*) == Q(S',A')$ **then**
      $A^* \leftarrow A'$
    end if
    $\delta \leftarrow R + \gamma Q(S',A^*) - Q(S,A)$
    $E(S,A) \leftarrow (1-\kappa)E(S,A) + 1$
    for each (s,a) visited in the episode **do**
      $Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \kappa\delta E(s,a)$
      if $A^* == A'$ **then**
        $E(s,a) \leftarrow \gamma\lambda E(s,a)$
      else
        $E(s,a) \leftarrow 0$
      end if
    end for
    $S \leftarrow S'; A \leftarrow A'; R \leftarrow R'$
    $t \leftarrow t + 1$
  end while
  $\delta \leftarrow R - Q(S,A)$
  $E(S,A) \leftarrow (1-\kappa)E(S,A) + 1$
  for each (s,a) visited in the episode **do**
    $Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \kappa\delta E(s,a)$
  end for
end for

As mentioned before, this study is restricted to a fixed runway configuration, but the same methodology can be applied for dynamic runway configurations RC_t by including it as a state feature as well as the wind state ws_t to define the set of possible configurations. It was not done due to the lack of available data and the difficulty of creating simulated data for these features, but it just increases the problem dimensionality, keeping the set of states discrete and finite.

The actions are also discrete and finite, and they are represented by a tuple $A_t = (u_t, v_t)$, where u_t and v_t are the arrival and departure service rates, respectively. The set of possible actions is limited by the capacity envelope function f_{wc_t} and the number of arrivals a_t and departures d_t on the queue. Since it is well known that the actions inside the region delimited by the capacity envelope are suboptimal and that the best actions are placed right on the capacity envelope curve or as close as possible to it, only these actions were taken into account to compose the actions set. So, considering that the service rates are integers and that the intersecting points of the capacity envelope func-

tion f_{wc_t} with the axes x of arrivals and y of departures are u_{max} and v_{max}, respectively, then it follows that:

$$v_t = \lfloor f_{wc_t}(u_t) \rfloor$$

such that

$$u_t \leq \min\{a_t, u_{max}\}$$

and

$$v_t \leq \min\{d_t, v_{max}\}$$

These constraints are illustrated in Figure 3 for an arbitrary queue (a_t, d_t). The set of actions for the state with this queue is represented by the solid line along the capacity curve, which was drawn intentionally as nonlinear to show that it can assume any nature in the proposed method. Actually, the possible actions are the points closest to, and below, the solid curve such that u_t and v_t are integers. So, these points are not exactly on the curve.

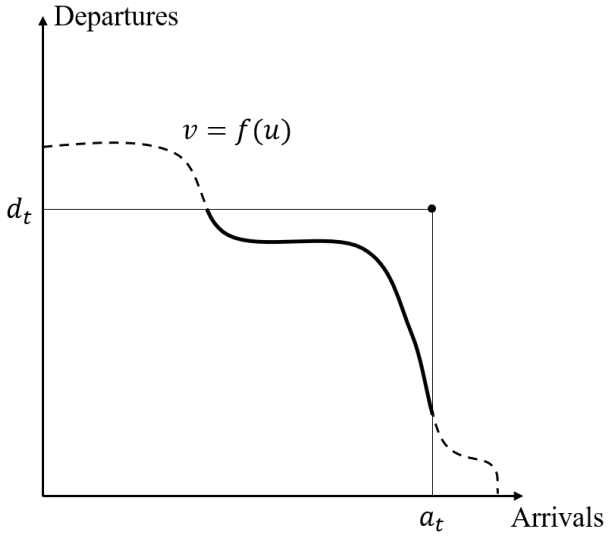


Figure 3 Set of actions for an environment state with queues a_t and d_t for arrivals and departures, respectively.

Another important implementation detail is that the states and actions are initialized during the learning process and not in its beginning. So, they are dynamically stored. In each episode, when a state is visited, all its possible actions and their corresponding initial state-action pair values are initialized.

As one can also see, the proposed RL algorithm requires the definition of some other parameters and functions. The objective function of Jacquillat et al. (2016) was used as a cost function and converted into a reward function by taking its opposite value, as follows:

$$R = -\left[\alpha (a_t - u_t)^2 + (d_t - v_t)^2\right]$$

One detail must be observed when it is done: since the reward function is always negative, the value function is either. So, if its initial value is set to zero, then the epsilon-greedy action will always explore unless all possible actions for a given state were already visited. Thus, previous knowledge about the best actions was used to accelerate the convergence and allow this definition of the reward function to better fit the cost function by starting from the following initial state-action pair value:

$$Q(s,a) = -\left[\alpha (a_t - u_t)^2 + (d_t - v_t)^2\right]$$

It can be noticed that the expression is the same as the reward function. It is so because it is previously expected that the best actions lead to the greatest reward in the short term. There is no reason to believe that an action that generates a greater delay in the short term may be better in the future because the delays accumulate over time. Therefore, this problem has this singularity: the best actions are those that produce the highest short-term return, that is, the greatest reward. However, there may be ties between different actions in the short-term and their long-term return has also to be considered, explaining why the problem solution is not immediate and the future consequences of each action must be taken into account.

Furthermore, the decaying-epsilon-greedy Q(λ) requires the definition of some parameters associated with the learning process, as one can see in the inputs of Algorithm 1. One of them is the step-size parameter $0 < \kappa \leq 1$, which dictates the learning rate of the algorithm. It is considered here as a constant because it works better in nonstationary problems, but it can also be defined in terms of the number of rewards k obtained from a given state-action pair by $\kappa = 1/k$. In this case, the update rule of the state-action pair value would follow the average return. However, it is less recommended for nonstationary problems.

Another parameter is the discount rate γ, which basically brings the rewards to the present value, considering that the most recent rewards have a higher weight in the estimate of the state-action pair value than the old ones because the

policy tends to get better along the learning process. Together with κ, the discount rate defines the update rule of Q-learning from the Bellman optimality equation as follows:

$$Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \kappa\left[R + \gamma \max_a Q(s',a) - Q(s,a)\right]$$

However, eligibility traces were introduced in the algorithm to turn the method more efficient by allowing the sight of more than one step forward. It produces an algorithm that mixes Q-learning with Monte Carlo method but keeps the incremental implementation. In this algorithm, called Q(λ), the parameter λ is the trace decay rate. So, the previous update rule is replaced by

$$Q(s,a) \leftarrow Q(s,a) + \kappa\delta E(s,a)$$

where

$$\delta = R + \gamma \max_a Q(s',a) - Q(s,a)$$

and $E(s,a)$ is the trace accumulated over time, when the action a is selected, by

$$E(s,a) \leftarrow (1-\kappa)E(s,a) + 1$$

and decaying, when the next action a' is optimal, by

$$E(s,a) \leftarrow \gamma\lambda E(s,a)$$

otherwise, the traces are reset to zero.

Finally, the action is chosen following an ε-greedy procedure on Q-values. This procedure is basically defined by selecting the greedy action with a probability $1-\varepsilon$ and a random action otherwise. It was created to balance exploitation with exploration, keeping the search for actions that were not tested yet but might outperform the greedy action. It is good at the beginning of the learning process because it prevents biased choices. However, it disturbs the learning process when the algorithm has already learned enough to choose good actions. Thus, since ε defines the degree of exploration, the best option is to decrease this parameter over time, producing what was called decaying-ε method. In this method, the value of ε starts at ε_i and finishes at ε_f, decaying linearly or exponentially along the episodes.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the tests, the following values were used: $\kappa = 0.5$, $\gamma = 0.9$, $\lambda = 0.5$, $\varepsilon_i = 1$, $\varepsilon_f = 10^{-6}$ and 2×10^6 episodes, with ε decaying exponentially in 10^6 episodes from ε_i to ε_f. These parameters can be adjusted to accelerate convergence, but any valid value is going to lead to the optimal policy. In Figure 4, there is the evolution of the average cost for the proposed RL algorithm.

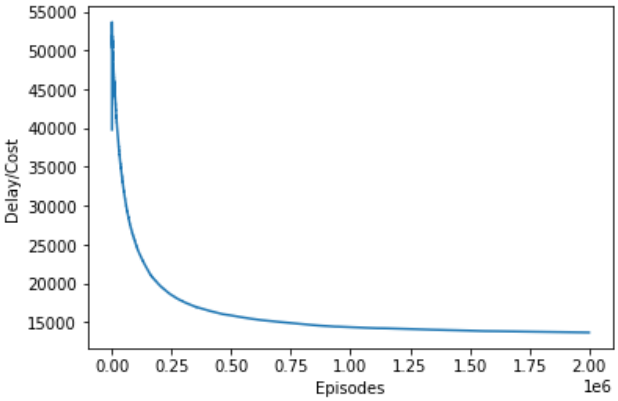


Figure 4 Average cost for the proposed RL algorithm in 2×10^6 episodes.

It can be noticed that there is a peak at the beginning of the learning process. It occurs due to the degradation of the policy because of the high exploration. Since the implementation was made in a way that the initial Q-value function is already a good estimate of the state-action pair values, the exploration initially disturbs the learning process, leading to worse actions. However, it quickly dissipates and the policy improves and converges fast. The convergence value is around 14000, but note that this value corresponds to the average of all costs during the learning process.

The problem was also solved with nonlinear programming, using the solver *knitro* inside the *AMPL*, just to check if the convergence value of the RL algorithm is around the values obtained with it. In Figure 5, there are the costs obtained in 100 episodes, with the weather condition varying randomly according to the probability of IMC during the time steps of each episode, which corresponds to the time frame of Table 1. The low number of episodes is due to the computational cost of nonlinear programming, which is more than 10^4 times higher than the RL algorithm. For the 1000 episodes, the average cost was around 13000.

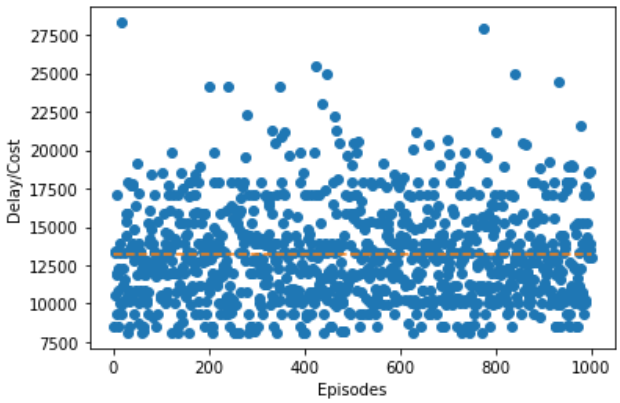


Figure 5 Costs for nonlinear programming in 1000 **episodes.**

5. CONCLUSIONS AND FUTURE INVESTIGATIONS

This study explored the application of Reinforcement Learning (Sutton & Barto, 2018) to the problem of optimizing runway capacity utilization under uncertain weather conditions for a fixed runway configuration. The main studies on the subject and their approaches were described and discussed and some of their contributions were used to support and structure the proposed method. This problem was first introduced by Gilbo (1993) and later extended in Gilbo (1997). Due to the lack of public data, the data of Gilbo (1997) was used in this study to test the new approach.

The proposed method was then presented, beginning with the introduction of Reinforcement Learning, Markov Decision Processes (MDP) and Q-learning with eligibility traces. Subsequently, the pseudo-code of the proposed method was described, and its implementation details were discussed. Finally, the method was tested, and its results were analyzed and compared to the results obtained with nonlinear programming using the solver *knitro* of *AMPL*.

It could be seen that the algorithm was able to learn the optimal policy even with the introduction of weather uncertainty and without any model of the environment, like in the usual dynamic programming approaches. So, it excludes the possibility of a policy biased by a wrong model, learning solely by interaction. Furthermore, the proposed approach was designed to dynamically store the states and actions, reducing significantly the impact of the problem's dimensionality, which affects dynamic programming since it must sweep all states and actions.

However, the method should undergo tests in real situations to be validated. Moreover, it considers only a fixed runway configuration. So, for future studies, this feature can be included in the environment's state, as well as the wind state, which defines the set of possible runway configurations. It is expected that these improvements do not require any major modification in the algorithm because the states and actions keep being discrete and finite. Another further upgrade would also replace the time step with the probability of IMC and work with function approximation, using supervised learning, like artificial neural networks. It would enhance significantly the final policy, enabling the approximation of the optimal action of states that were not visited during the learning process and generalizing the method for continuous states.

References

Dell'Olmo, P. & Lulli, G. (2003). A dynamic programming approach for the airport capacity allocation problem, IMA Journal of Management Mathematics 14(3), 235–249.

Gilbo, E. (1993). Airport capacity: representation, estimation, optimization, IEEE Transactions on Control Systems Technology 1(3), 144–154.

Gilbo, E. (1997). Optimizing airport capacity utilization in air traffic flow management subject to constraints at arrival and departure fixes, IEEE Transactions on Control Systems Technology 5(5), 490–503.

Gilbo, E. & Howard, K. W. (2000). Collaborative optimization of airport arrival and departure traffic flow management strategies for cdm Anais do Proceedings[...], 3rd USA/Europe ATM Seminar FAA and EUROCONTROL Online.

Hall, W. D. (1999). Efficient capacity allocation in a collaborative air transportation system PhD thesis, Massachussets Insitute of Technology (MIT).

Jacquillat, A. & Odoni, A. R. (2015). An integrated scheduling and operations approach to airport congestion mitigation, Operations Research 63(6), 1390–1410.

Jacquillat, A. & Odoni, A. R. (2018). A roadmap toward airport demand and capacity management, Transportation Research Part A: Policy and Practice 114, 168–185.

Jacquillat, A., Odoni, A. R. & Webster, M. D. (2016). Dynamic control of runway configurations and of arrival and departure service rates at JFK airport under stochastic queue conditions, Transportation Science 51(1), 155–176.

Shone, R., Glazebrook, K. & Zografos, K. G. (2019). Resource allocation in congested queueing systems with time-varying demand: An application to airport operations, European Journal of Operational Research 276(2), 566–581.

Shone, R., Glazebrook, K. & Zografos, K. G. (2021). Applications of stochastic modeling in air traffic management: Methods, challenges and opportunities for solving air traffic problems under uncertainty, European Journal of Operational Research 292(1), 1–26.

Sutton, R. S. & Barto, A. G. (2018). Reinforcement Learning: An Introduction 2nd edition, MIT Press, Cambridge.

Teodorovic, D., Trani, A., Kane, A. & Baik, H. (2004). Fuzzy mathematical programming model for optimizing airport capacity utilization Anais do Proceedings[...], Proceedings of the Triennial Symposium on Transportation Analysis, TRISTAN V French West Indies Le Gosier.

Aircraft Recovery Problem: Implementation of a Time Band Model Using the Python-MIP Library.

João Victor Mendes Rocha.
Universidade Federal de Santa Catarina.

joaorochabr@gmail.com

PAPER ID: SIT2189

ABSTRACT

This study highlights the impact on costs generated by flight delays and cancellations, which pose a challenge for airlines in the country's economic context. The Aircraft Recovery Problem (ARP) involves the recovery of schedules, aircraft, crews, and passengers. In this context, the objective of this study was to develop a flight planning model aimed at minimizing the costs resulting from aircraft delays and cancellations. To achieve this goal, a systematic literature review was conducted on the ARP, identifying relevant solution methods and adopting a network representation model. The innovative use of the Python-MIP library was employed to implement an algorithm capable of solving the aircraft recovery problem in a generalized manner, covering various scenarios considered by other researchers. The obtained results are illustrated for three different scenarios, taking into account the cancellation cost and passenger load on each flight. The comparison of the results with the study by Arguello et al. (1998) revealed a percentage difference. The discussion emphasizes the importance of considering the computational complexity and limitations of approximation models when dealing with real problems, recognizing that the results are only approximations of reality. The proposed algorithm allows for a generalized and efficient resolution of the ARP.

Keywords: Aircraft Recovery Problem. Optimization. Scheduling.

.

2. BRIEF INTRODUCTION

The airline recovery problem, known as the Aircraft Recovery Problem (ARP), is complex and involves sequential stages of schedule recovery, aircraft, crew, and passenger recovery. One of the steps involves determining flight departure and cancellation times, as well as revising routes affected by the aircraft.

Recovery problems are typically formulated for cost minimization rather than profit maximization models since airline revenues are fixed, as tickets are generally sold in advance (VINK, J. et al., 2021). VINK (2021) categorizes ARP solution methods by the type of methodology used: exact optimization methods, metaheuristic methods, hybrid methods, multi-agent systems, among others.

It is important to resolve recovery-related problems as quickly as possible because after a certain time, solutions may become unviable due to time constraints and their impact on subsequent stages. The first step in the recovery plan is to recover the aircraft, the second stage is crew recovery, and finally, the re-accommodation of passengers affected by disruptions (BELOBABA et al., 2009, p. 259).

The costs of delays have a direct impact on the financial results of airlines, harming their profits. In the first quarter of 2019, the Brazilian airline Gol recorded costs of services provided totaling R$ -2,083,594,685. Additionally, the additional costs associated with delays were approximately R$ -12,844,198.07, representing 1% of the service costs. In the last quarter of 2019, TAM recorded costs of services provided amounting to R$ -14,183,903,843. As for the costs related to delays, they were specified as R$ -1,088,687.18.

There are various solution methods for the ARP, including exact optimization methods, metaheuristics, hybrids, and multi-agent systems. It is crucial to solve recovery problems as quickly as possible since delayed solutions can become infeasible and impact subsequent stages. The objective was Developing a new flight planning using the Python programming language and the MIP library to minimize the costs generated by aircraft delays and cancellations.

3. PROBLEM DEFINITION

This study is grounded in the methodology established by Arguello, Bard, and Yu (1998), which is designed to minimize costs associated with the repositioning of irregular aircraft. Irregular aircraft pertains to those unable to adhere to the originally scheduled flight plan due to mechanical or meteorological factors. Arguello, Bard, and Yu (1998) devised a time band model to address this issue. The primary objective of this method is to formulate a revised aircraft allocation plan that converges with the original schedule while accounting for incurred delays, all while striving to achieve this reallocation at the lowest possible cost by the end of the day.

To facilitate a comprehensive grasp of the problem, we will commence with a general definition of Aircraft Repositioning Problem (ARP) and subsequently delve into an in-depth elucidation of the network model pioneered by Arguello, Bard, and Yu (1998). The input data essential for this problem encompasses a flight schedule serving as the foundational framework, costs linked to flight delays and cancellations, aircraft assignments, expenses incurred for aircraft replacement, and a roster of available aircraft. The entirety of the flight network is considered in the quest for viable solutions. The desired outcome involves the generation of a novel, cost-optimized scheme for reallocating aircraft to their original schedules.

A prevalent airline policy involves upholding the original schedule for the subsequent day by imposing an aircraft balance constraint. This constraint necessitates the fulfillment of aircraft reassignment following an operational disruption. The time horizon for contemplating aircraft reassignment aligns with the conclusion of the current day.

An optimal solution is one that reinstates the airline's initial schedule, thereby ensuring the ability to fulfill all initially planned flights for the ensuing day.

When an aircraft becomes inoperative, the locations of all aircraft and their designated

scheduled flights are known. It is assumed that there is a limited number of spare aircraft, unallocated and available for use. These aircraft can serve as substitutes for other inoperative and/or designated aircraft as necessary.

The flight schedule and assigned routes determine the expected aircraft locations at the end of the day to fulfill the scheduled flights for the following day. Aircraft balancing is a fundamental process in airport management, involving the assurance that the number of aircraft arriving and departing from a station is balanced and aligns with the values previously programmed by the airlines.

This is crucial to ensure airport operations' efficiency and to prevent delays and overloads at specific times or locations. Balancing can be conducted at different levels, such as at a single station or throughout the airport system, considering factors such as aircraft characteristics, runway and terminal capacity, and air traffic demands.

Other constraints may limit aircraft reassignment. The first of these is the minimum return time, which is the minimum time interval an aircraft must wait after landing (arrival) before it can take off again (departure). This minimum time constraint can be applied system-wide or to specific fleets or stations.

The second constraint pertains to the airline's flexibility in permitting substitutions between fleets. In certain circumstances, such substitutions can prove advantageous.

Station requirements are factored into aircraft allocation planning. These requirements encompass operating hours and closing times, which can be either general or specific to each fleet type.

Operating hours determine permissible departure times from a station, while closing times indicate when departures are not allowed (curfew). An aircraft route is considered feasible if all departures on the route can be completed before the respective station's closing time.

Another critical viability condition for aircraft routing is route connectivity, which necessitates that the destination of the first flight on a route aligns with the origin of the subsequent flight. Consequently, an aircraft routing will only be deemed viable if it adheres to correct connectivity, adheres to minimum return times, and does not violate the curfew of the corresponding station.

A solution (routing) to the Aircraft Repositioning Problem (ARP) comprises a set of aircraft routes, with one designated for each available aircraft. To attain viability, each routing must satisfy the aforementioned viability conditions. Furthermore, each scheduled flight must be allocated to a maximum of one route, and any unassigned flight is treated as canceled. Lastly, the solution must ensure aircraft balance. By the day's end, the aircraft allocated to a terminal station must indeed be present at the specified station after the implementation of the new route, thereby ensuring that all stations possess an equal number of aircraft at the conclusion of the planning period.

To fulfill the objective of discovering the most cost-effective solution for the prevailing problem, cost functions must be provided for each alternative considered for each flight. This implies that, for each flight, cost functions for delay, cancellation, and aircraft replacement must be supplied.

Drawing from the costs associated with each potential response to aircraft delays, it becomes feasible to evaluate aircraft reassignment for regular flights. Implicit within each aircraft route are the departure and arrival times that the designated aircraft can adhere to for each flight on the route.

These times govern the potential delay costs linked to the route, along with any replacement costs if different aircraft were originally assigned to certain flights. Flights that do not align with the routes assigned to aircraft are categorized as canceled, and the ensuing costs are incorporated into the total cost of each assigned route. These costs play a pivotal role in determining the cost-effectiveness of feasible solutions for the problem under consideration, with the overarching aim of identifying a lower-cost solution.

4. TIME BAND MODEL

A time band network is constructed based on the assumption that the event horizon is partitioned into fixed-size time intervals, and the following input data is provided:

1. Flight data, which includes flight identification, origin, destination, scheduled departure and arrival times, and the function used to calculate delay costs.
2. A list of available aircraft, including their time and location.
3. A list of station data, specifying operating hours.

With these foundational assumptions in place, it becomes possible to transform the Aircraft Repositioning Problem (ARP) into a time band network.

To implement the algorithm proposed by Arguello, Bard, and Yu (1998), the following information is required:

- A list of nodes (L).
- A minimum turnover time in minutes (MTT).
- A flight delay function k per unit of time ($DLC(t)$).
- A cost function for the delay of flight k from node i to node j ($d(k,i,j)$).

The initialization step primarily involves sorting the station nodes. Since there are at most r of these nodes (where r is the number of available aircraft), this sorting process can be completed in $O(r\ log\ r)$ time complexity.

The transformation process utilizes at most $t \times r$ nodes and $(t-1)\times(n+m)$ arcs. Consequently, the effort required for transformation is polynomial in relation to the number of flights, stations, and time intervals.

The resulting network comprises two distinct node types: station nodes and terminal nodes. Each station node is connected to other station nodes through outgoing arcs, representing the scheduled flights departing from the departure station. The number of these flight arcs for each station node corresponds to the total number of scheduled flights departing from the station during the considered time horizon.

Each station node has an equal number of outgoing arcs leading to specific stations, signifying the availability of each flight for each time segment during which the aircraft is available. Station nodes may lack directed incoming arcs, indicating that the available aircraft are already on the ground, while nodes with these arcs represent the available aircraft due to flight arrivals.

Each station node has a directed arc leading to its respective terminal node. Unlike station nodes, terminal nodes do not need to represent a single time segment but encompass all time segments in which aircraft can land at a station without being able to take off due to airport operational restrictions. Consequently, terminal nodes do not feature outgoing arcs. The terminal node serves as the endpoint for both aircraft in flight and aircraft available during a period before the event horizon with no flight allocation.

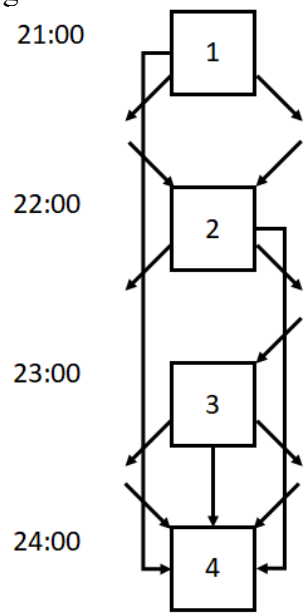


Figure 1 Time Band Network for a Station.

The specified time interval is set at one hour, with nodes 1, 2, and 3 representing stations that are separated by one-hour intervals. Node 4 is a terminal node. Here's a breakdown of the nodes and their significance:

Node 1 signifies that one or more aircraft are already positioned at the station and will become available at 21:00 hours. At 22:00 hours, the two outgoing arcs from node 1 indicate that two flights have been scheduled to depart from station 1 at 21:00 hours. The arc from node 1 connecting to node 4 indicates that the available aircraft have no scheduled departure and will remain at the station.

Nodes 2 and 3 each have two and one incoming arcs, respectively, indicating the possibility of two flights arriving between 22:00 and 23:00 hours and one flight arriving between 23:00 and 00:00 hours. Since the airport closes at 00:00 hours, it is expected that the flight from node 3 will arrive before 23:30. Otherwise, no departure arcs can originate from node 3, and nodes 3 and 4 could be merged into a single terminal node.

Similar to node 1, nodes 2 and 3 also have arcs connecting them directly to terminal node 4, indicating that aircraft available after 22:00 hours can terminate at the station. Flight arcs to node 4 indicate that aircraft serving these flights terminate at node 4. It's important to note that a flight can land at any time after 00:00 hours; however, to take off, the flight needs to be ready before 00:00 hours.

The terminal node aggregates all activities after the departure time, encompassing both flight arrivals after the airport's operational hours and serving as a collector for all aircraft remaining at the corresponding station beyond the operating hours.

The process of transforming the time-flow network employs the first arrival convention to determine the feasibility of an aircraft at a station. By marking the station with the earliest available time, it becomes possible to ascertain the first point at which aircraft will be available within the time band. From that point onwards, departure times are determined for all flights outside the time segment, along with the associated delay for each flight. Thus, it is assumed that all aircraft can commence servicing a flight at the same time as the earliest available aircraft within the corresponding time band.

A mathematical representation can be constructed from a time band network. This model can also prove valuable in obtaining precise lower bounds when delay costs are approximated due to extended time bands.

The following are the indices, sets, and variable parameters used in the formulation of the Time Band Model for the Aircraft Repositioning Problem (ARP):

Indices and Sets:

- i, j: Node indices.
- k: Flight index.

Sets:

- F: Set of flights.
- $G(i)$: Set of flights originating from station-flow node i.
- $H(k, i)$: Set of destination nodes for flight k originating from station-flow node i.
- I: Set of station-flow nodes.
- J: Set of station-terminal nodes.
- $L(i)$: Set of flights terminating at node i.
- $M(k, i)$: Set originating from station-flow node for flights k terminating at node i.
- $P(k)$: Set of station-flow nodes from which flight k originates.
- $Q(k)$: Set of station-flow nodes within the station containing a terminal station node i.

Parameters:

- a_i: Number of aircraft available at node i.
- c_k: Cost of flight k cancellation.
- d_{ij}^k: Cost of flight k delay from station-flow node i to node j.
- h_i: Number of aircraft required at the conclusion of the event horizon at terminal station i.

Variables:

- •x_{ij}^k: Aircraft flow for flight k departing from station i to node j.
- y_k: Flight cancellation indicator.
- z_i: Aircraft flow from station node i to terminal node within the same station.

The variables x_{ij}^k and z_i indicate the utilization of aircraft resources along the network arcs. Variable z_i signifies the number of aircraft available in a specific network segment that have not been allocated to flights for the remainder of the day. This is analogous to aircraft remaining available at node i and proceeding directly to a corresponding terminal node.

On the other hand, variable x_{ij}^k indicates the assignment of an available aircraft within time segment i for flight k. This is analogous to an aircraft flying from station node i on flight k with destination node j.

The y_k variables are auxiliary artificial variables, as they assist in capturing the cancellation cost for flights to which aircraft cannot be efficiently assigned in terms of costs.

The mathematical modeling employed here represents a network flow model but incorporates flight cancellation indicators, represented by variable y_k, following the original problem definition.

The Time Band Model for ARP is then defined by Equations (1)-(7).

Arguello et al. (1998) primarily adapted the model directly from the time flow network, constructing the sets based on node and arc incidences. The parameter d_{ij}^k is the only one that needs to be computed explicitly, while the other parameters are directly inputted for the problem.

The objective function defined in Equation (1) minimizes the sum of total delay costs for assigned flights and total cancellation costs for unassigned flights.

$$Minimize \sum_{k\in F}\sum_{i\in P(k)}\sum_{j\in H(k,i)} d_{ij}^k\, x_{ij}^k + \sum_{k\in F} c_k y_k \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{i\in P(k)}\sum_{i\in H(k,i)} x_{ij}^k + y_k = 1, \quad \forall k \in F \quad (2)$$

$$\sum_{k\in G(i)}\sum_{j\in H(k,i)} x_{ij}^k + z_i - \sum_{k\in L(i)}\sum_{j\in M(k,i)} x_{ji}^k = a_i, \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{k\in L(i)}\sum_{j\in M(k,i)} x_{ij}^k + \sum_{j\in Q(i)} z_j = h_i, \quad \forall i \in J \quad (4)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in F, i \in I, j \in H(k,i) \quad (5)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in F \quad (6)$$

$$z_i \in Z_+, \quad \forall i \in I \quad (7)$$

Equations (3) and (4) ensure the conservation of restricted flow in the network. The first equation implies aircraft flow along flight arcs and, after subtracting the flow to the time-station node, must be equal to the number of aircraft already present in the station but available during the associated time segment. The constraint (4) enforces aircraft balance by requiring that the aircraft flow at each terminal station node is equal to the number of aircraft to be terminated at the corresponding station.

Constraints (5) and (1) mandate that the aircraft flow along flight arcs and the cancellation indicator are binary. Constraint (7) requires that the z_i variables be non-negative integers. It is possible that in some cases, these z_i variables may assume a value greater than 1 if more than one aircraft becomes available at a specific station node, and no flight assignments are made for these aircraft.

Although it may seem intuitive and arbitrary, this model constitutes a challenging integer programming problem. If cancellation and flight coverage restriction variables are removed from the formulation, a minimum cost flow problem of a single product with an upper limit remains.

5. IMPLEMENTATION OF MIP-ARP ALGORITHMIME.

To address the Aircraft Repositioning Problem (ARP), was developed a Python algorithm using the integrated development environments (IDE) Anaconda and Spyder, versions 5.2.2.

The implemented algorithm leverages the MIP library introduced in Section 2.3. This library provides specialized tools for creating programs aimed at solving optimization problems with objective functions and linear constraints. It enables the consideration of continuous and discrete variables, including binary variables, within Python.

Furthermore, we employed a graph creation algorithm, as detailed in Appendix A, to generate a graph that provides the necessary data input for the optimization model. This encompasses defining the indices and sets used in the Model time band ARP, as specified in

Equations (1)-(7). The nodes in the time band network can be categorized into two types:

1. Flow nodes: These represent origins or flight passage points.
2. Terminal nodes: These indicate the locations where aircraft will conclude their actions within the planning horizon.

In the subsequent sections, we present the generated graph to represent the foundational problem, elaborate on the sets and parameters to enhance the understanding of the optimization model's formulation using the MIP library, and explain the data format utilized in constraints and objective functions.

Figure 2 depicts the time band approximation network created for the example problem. Each station's time node represents thirty-minute intervals starting from the associated time. For instance, node 1 represents the time interval from 14:00 to 14:29. Within this network, nodes 5, 11, 19, and 24 correspond to destination stations (terminal nodes), while all other nodes represent nodes within the flow network.

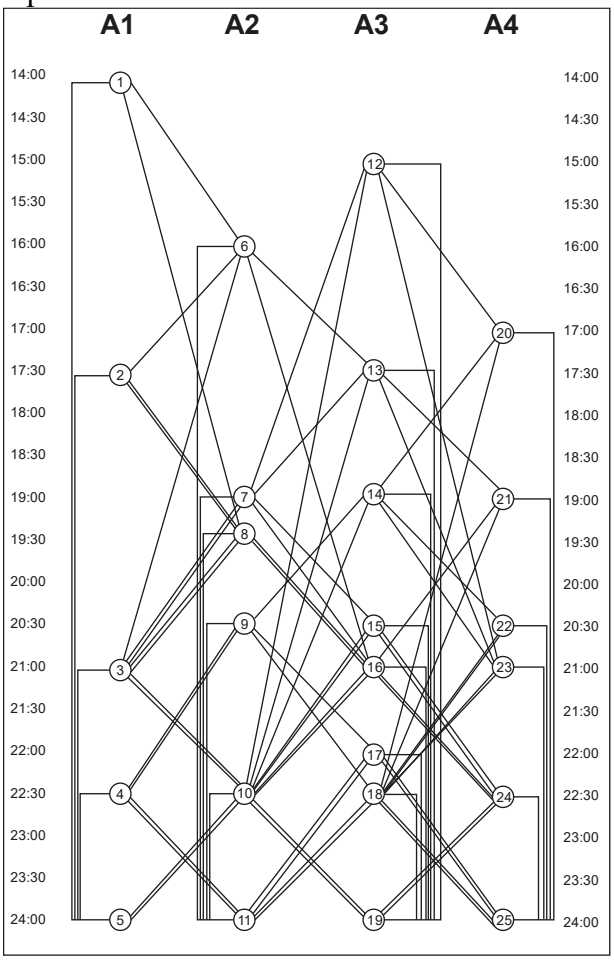


Figure 2 Graph: Representation of possible flights.

Accurate definition of the utilized sets is crucial for the algorithm to yield a feasible solution for the Model time band (1)-(7). The elements within these sets determine the index variations in the repetition loops employed in the algorithm and possess a strong correlation with routing possibilities.

For instance, in the network illustrated in Figure 1, flight "flight11" is represented by pairs of nodes [1,6], [1,8], [1,5], [2,8], [3,10], and [4,11]. The arc between nodes [1,5] is only used if "flight11" is canceled, emphasizing that the flight is not associated with a single arc but rather with a set of nodes representing its origin and destination.

Hence, the algorithm developed here commences by defining the sets and parameters used in the formulation of the time band Model (1)-(7):

• I: the set of station-flow nodes. • J: the set of station-terminal nodes, which, in the graph, are represented by nodes 5, 11, 19, and 25. • F: the set of flights. • F: the set of flights, with each flight identified by its original itinerary and identifier. If a flight experiences a delay, a different arc will be used, but the original identifier is retained.

The remaining sets are defined using dictionaries and tuples, which are data structures in Python that allow for storing sets of elements, akin to lists. The primary difference is that tuples are immutable, meaning their elements cannot be altered after the tuple is created.

The set G, considered in the formulation of the Model time band (6)-(12), is defined as a dictionary that relates to a list of flights. This relation indicates the possible origin node for flights in the set F that are feasible at the indicated node. For example, node 1 can be the origin of 'flight11,' while node 2 can be the origin of 'flight11' and 'flight22.' Similarly, node 7 can be the origin of 'flight12,' 'flight14,' 'flight21,' and 'flight23.'

Set H is defined as a dictionary employing tuples of two elements, representing a feasible flight and a departing node, indicating possible destination nodes for this pair. Some tuples may have multiple destinations departing from the same flight. Due to the nature of the time flow network, the

two mentioned destinations refer to the next aircraft activity and the time it will occur. For instance, from node 1, the arcs can lead to nodes 6 and 8. Arcs connecting the same airport are only allowed between flow nodes and terminal nodes.

Set L is defined as a dictionary that associates all nodes with their arrival possibilities for a flight. For example, node 1 will be empty since there are only outgoing arcs and no arrivals at the node, whereas node 8 will have three possibilities...

Set M is a dictionary of tuples relating a flight to an arrival node, returning the possible origin node for the flight. Set M is similar to set H but employs the inverse view for arcs and nodes.

Set P is a dictionary representing all the origin possibilities for a flight k, with each origin except for the original itinerary being empty.

Last set Q is a dictionary relating flights to nodes within the same airport that have an arc to the terminal node of the same airport.

Furthermore, it is worth noting that there was a necessity to create a set of artificial flights that indicate movement between nodes within the same airport. These fictitious flights allow a flight to enter one node and exit the airport through another node. The fictitious flights are denoted as "flightA1," "flightA2," "flightA3," and "flightA4."

6. RESULTS

The program was executed for the three scenarios employed by Arguello et al. (1998). The instance data used to illustrate the results are consistent with those considered by Arguello et al. (1998), as depicted in Table 1.

Arguello et al. presented a schedule for this example, wherein the cancellation cost used is a function of the number of passengers on each flight. The passenger load for each flight was determined randomly, assuming that aircraft 1 is at station AAA, aircraft 2 is at station BBB, and aircraft 3 is at station CCC at the beginning of the planning horizon.

The same network is used for all three considered scenarios, with the only difference being the supply and demand of aircraft at each node:

- In Scenario 1, for instance, the aircraft supply ai is 0 for all station time nodes except $a6 = a12 = 1$. Similarly, the demands $h11 = h19 = 1$, and all other $hi = 0$.
- In Scenario 2, the aircraft supply ai is 0 for all station time nodes except $a1 = a12 = 1$. Likewise, the demands $h5 = h19 = 1$, and all other $hi = 0$.
- In Scenario 3, the aircraft supply ai is 0 for all station time nodes except $a1 = a6 = 1$. Correspondingly, the demands $h5 = h11 = 1$, and all other $hi = 0$.

Table 1 Base Scenario

Aircraft	Flight	Origin	Destination	Departure	Arrival	Cancellation Cost.
1	11	A1	A2	14:10	15:20	7.350
	12	A2	A3	16:05	17:00	10.231
	13	A3	A2	17:40	18:40	7.434
	14	A2	A1	19:20	20:35	14.191
2	21	A2	A1	15:45	17:00	11.198
	22	A1	A2	17:40	18:50	12.985
	23	A2	A3	19:30	20:30	11.491
	24	A3	A2	21:15	22:15	9.581
3	31	A3	A4	15:15	16:20	9.996
	32	A4	A3	17:30	18:30	15.180
	33	A3	A4	19:10	20:20	17.375
	34	A4	A3	21:00	22:05	15.624

The program was executed for the three scenarios employed by Arguello et al. (1998). The instance data used to illustrate the results are consistent with those considered by Arguello et al. (1998), as depicted in Table 1.

Arguello et al. presented a schedule for this example, wherein the cancellation cost used is a function of the number of passengers on each flight. The passenger load for each flight was determined randomly, assuming that aircraft 1 is at station AAA, aircraft 2 is at station BBB, and aircraft 3 is at station CCC at the beginning of the planning horizon.

The same network is used for all three considered scenarios, with the only difference being the supply and demand at each aircraft.

Table 2 Objective Function Value

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Base Flow	39.206	45.255	58.175
MIP Delay Cost + Cancellation Cost Result	28.050	22.176	35.285

The model's solution enabled the identification of an objective function that led to cost reduction, which was previously primarily associated with the complete cancellation of flights assigned to a specific aircraft's route. The algorithm discovered strategies for utilizing aircraft that had no planning irregularities, thus minimizing these costs. This entailed making decisions regarding which flights to delay, when to enact delays, and whether delaying a flight would be more advantageous than canceling it.

When examining the Cost Reduction Rates discussed in Chapter 2.1 of this study, we can calculate the minimum and maximum values resulting from these reductions.

For the Gol airline in the year 2019, a 28% reduction would equate to a minimum cost reduction of R$ 3,596,375, while a 51% reduction would yield a maximum cost reduction of R$ 6,550,541.

Conversely, for the LATAM airline, the minimum cost reduction would amount to R$ 304,832, with the maximum reduction reaching R$ 555,230. These calculations are pivotal in comprehending the range of potential cost reductions that each company could achieve based on the mentioned percentages.

Although approximation models can provide useful and closely aligned results with reality, it is imperative to acknowledge that they remain approximations and may not encapsulate all aspects and intricacies of the problem at hand.

7. REFERENCES

ARGUELLO, M. F. Framework for exact solutions and heuristics for approximate solutions to airlines' irregular operations control aircraft routing problem. 1997. Tese (Doutorado em filosofia) – Departamento de Engenharia Mecanica, Universidade do Texas, Austin, 1997.

ARGUELLO, M.F.; BARD, J.F; YU, G. Models and Methods For Managing Airline Irregular Operations. Operation Research in the Airline Industry, Nova Iorque, v. 9, n. 1, p. 1-45, dez. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS. PANORAMA **2019.** O setor aéreo em dados e análises. São Paulo: ABEAR, 2020.

SANTOS, Haroldo G.; TOFFOLO, T. **Mixed integer linear programming with Python**. From https://media.readthedocs.org/pdf/python-mip/latest/python-mip.pdf.

THENGVALL, B.G; BARD, J.F; YU, G. Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations. **IIE Transactions.**

VINK, J. ET AL. Dynamic *Aircraft Recovery Problem* – An operational decision support framework. **Computers and Operations Research.** 2020.

ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE DESVIOS PARA RESOLUÇÃO DE CONFLITOS ENTRE EVTOL UTILIZANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Cristiano P. Garcia*, Li Weigang
Universidade de Brasília, Departamento de Ciência da Computação

*** Corresponding author e-mail address:** garcia.usp@gmail.com

PAPER ID: SIT2322

ABSTRACT

In the coming years, electric aircraft capable of vertical takeoff and landing (eVTOL) will bring about a revolutionary change in urban air mobility. However, this new paradigm demands developing specific tools to manage airspace and enable autonomous operations. Numerous manufacturers are currently working on the development of these aircraft. As adoption increases gradually, the expected high volume of simultaneous flights will present challenges for air traffic control systems. Furthermore, eVTOL aircraft have the potential to operate without onboard pilots, reducing costs but also increasing the complexity of safety solutions. A redundant set of conflict detection and resolution systems is required to address these challenges. This study explores the potential of deep reinforcement learning models to solve this problem. By leveraging embedded systems such as ADS-B for independent conflict detection, deep reinforcement learning models can suggest actions even in scenarios where conflicts are unobserved. This flexibility makes them well-suited for resolving conflicts, as training a system with all possible conflict configurations is impractical. The study employed a system based on Deep Q Network (DQN) models. These models adjusted aircraft trajectories by deviating minimally from their ideal paths to resolve conflicts. A customized simulator was also developed to test and compare multiple deep reinforcement learning agents with alternative strategies. The results demonstrate that these models can propose maneuvers that reduce conflict occurrences without significantly impacting aircraft displacement or fuel consumption.

Keywords: Air traffic control, eVTOL, deep reinforcement learning, urban air mobility.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been partially supported by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) under the grant number 309545/2021-8.

1. INTRODUÇÃO

Aeronaves denominadas eVTOL (acrônimo em Inglês para aeronave elétrica com capacidade de pouso e decolagem na vertical) estão sendo desenvolvidas por diversos fabricantes e espera-se que estejam em operação dentro de poucos anos. A principal aplicação destas novas aeronaves será o transporte de passageiros nos grandes centros urbanos e suas imediações (Mueller et al., 2017).

A integração de um novo tipo de aeronave à mobilidade aérea urbana (UAM, da sigla em Inglês para *Urban Air Mobility*) aumentará a complexidade do espaço aéreo urbano, trazendo consigo a necessidade do desenvolvimento de diversos sistemas capazes de garantir que os voos sejam realizados de forma segura e eficiente (Thipphavong et al., 2018).

Este trabalho considera um ambiente no qual os eVTOL terão autonomia para realizar desvios de suas rotas caso seja detectado um possível conflito com outras aeronaves. O objetivo é o desenvolvimento de um sistema que seja capaz de evitar a perda de separação utilizando métodos de Inteligência Artificial (IA).

2. MÉTODOS

Os resultados obtidos a partir de modelos de aprendizado de máquina nos últimos anos causaram um grande aumento no interesse por todas as áreas relacionadas à IA. O aprendizado por reforço utilizando redes neurais profundas (DRL, da sigla em Inglês para *Deep Reinforcement Learning*) é um dos ramos do aprendizado de máquina por meio do qual um agente pode ser treinado para tomar decisões de modo a obter recompensas de acordo com uma política preestabelecida (Sutton & Barto, 2018).

Durante o treinamento em um sistema de DRL, um agente interage com o ambiente por meio de ações $a \in \mathbf{A}$. Tais ações modificam o ambiente, ou seja, o levam a um novo estado $s \in \mathbf{S}$. A avaliação da ação tomada permite que o agente receba uma recompensa r (Alpaydin, 2021). Neste trabalho será utilizado um agente de DRL chamado Dueling DQN, que foi criado em 2016 e já foi utilizado em diversas aplicações, sendo capaz de obter resultados muito superiores àqueles obtidos por humanos nas mesmas tarefas (Wang et al., 2016).

Um simulador customizado foi implementado para ser utilizado como ambiente de treinamento. O espaço aéreo simulado possui dimensões 1000 x 1000 m e nele são distribuídos 30 vertiportos em pontos aleatórios a cada episódio. O número de aeronaves em voo simultâneo pode ser modificado conforme o teste a ser realizado, mas o valor aplicado foi tipicamente de 7 aeronaves por episódio. O objetivo de cada aeronave é realizar um voo decolando de um dos vertiportos em direção a um outro vertiporto. Os locais de origem e destino também são escolhidos de forma aleatória antes do início do episódio.

No início de cada simulação, as aeronaves decolam simultaneamente e inicialmente seguem na direção do vertiporto de destino. Porém caso algum conflito seja detectado, ou seja, se existe a previsão de que uma outra aeronave possa se aproximar ao ponto de que a separação fique abaixo de um determinado valor, o agente de DRL indica uma ação a ser tomada por meio do desvio de trajetória. Assim, a aeronave realiza uma curva para evitar o conflito.

A ação realizada é avaliada em relação a diversos aspectos para calcular o valor da recompensa a ser oferecida ao agente. No âmbito deste trabalho, será considerada especificamente a qualidade da ação em relação à eficiência do desvio, em outras palavras, à sua capacidade de evitar o conflito sem fazer com que o desvio da trajetória pretendida seja excessivo.

Considerando o exemplo de um conflito que possa ser evitado por meio da realização de uma curva de 30 graus à esquerda, entre outras formas. Durante o período de treinamento, o agente não tem a informação de que esse valor seria o mínimo a ser aplicado. As informações recebidas em relação ao conflito são apenas aquelas relacionadas à sua configuração, ou seja, em relação às posições relativas das aeronaves envolvidas. Assim, o agente não treinado pode sugerir outras formas de solução do conflito, incluindo curvas maiores do que os 30 graus do exemplo em questão.

Ainda no exemplo anterior, o que fará com que sistema compreenda que uma curva maior ou

menor não é desejada são as recompensas. Para isso, foi estabelecida uma recompensa com valor negativo de -1 ponto a cada dez graus de curva realizada. Portanto a recompensa recebida teria o valor de -3 neste caso. Inicialmente essa recompensa negativa seria um incentivo para que o sistema não realizasse qualquer desvio. Porém existem outros componentes no cálculo da recompensa que gratificam o agente pela sua capacidade resolver ou evitar conflitos. A partir das tentativas de maximizar o valor da recompensa, eventualmente o sistema chegará a uma medida para a curva a ser executada que resolve o conflito e realiza apenas os desvios necessários.

3. RESULTADOS

Foi realizado um treinamento com duração de 10.000 episódios para que o modelo DRL pudesse ser capaz de realizar os desvios de rota adequadamente. O eixo *y* do gráfico apresentado na Figura 1 mostra a distância adicional percorrida pela aeronave a cada episódio devido à realização dos desvios. No eixo *x* são representados os episódios do treinamento. A linha azul mostra o desempenho do modelo DRL. As outras duas linhas representam outros modelos para comparação.

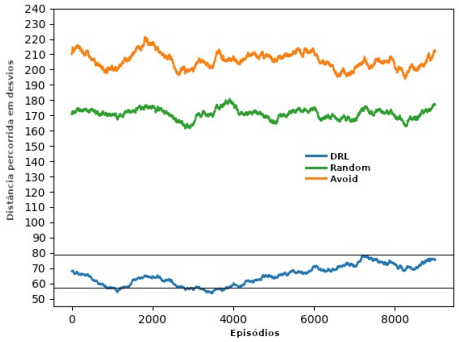


Figure 1 Distância adicional percorrida em desvios

Observa-se que a distância percorrida aumentou ligeiramente com o passar dos episódios, porém o valor não ultrapassou a casa dos 80m. Um aumento moderado já era esperado, afinal a aeronave precisa desviar de sua rota original para evitar o conflito com potenciais intrusos. Mas, nesse caso, o resultado mostra que o sistema foi capaz de limitar a quantidade de metros adicionais percorridos no desvio a partir da interpretação das recompensas recebidas a cada passo.

4. CONCLUSÃO

Caso as novas aeronaves venham a ser utilizadas em grande escala nas grandes cidades do Brasil, serão necessárias diversas adaptações nos sistemas atuais de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM, da sigla em Inglês para Air Traffic Management). Além disso será necessário criar diversos outros componentes para permitir uma integração harmônica no espaço aéreo já bastante congestionado.

O sistema desenvolvido é capaz de proporcionar a aeronaves eVTOL a capacidade de realizar desvios de sua rota de modo a evitar desvios sem, contudo, afastar-se desnecessariamente da rota original. Tal capacidade poderá ser combinada com outros sistemas para chegar a veículos que sejam capazes de navegar de forma autônoma com segurança.

Referências

Alpaydin, E. (2021). An Introduction to Machine learning 4th edition, The MIT Press,.

Mueller, E. R., Kopardekar, P. H. & Goodrich, K. H. (2017). Enabling airspace integration for high-density on-demand mobility operations Anais do 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, p. 3086.

Sutton, R. S. & Barto, A. G. (2018). Reinforcement learning: An introduction, MIT press,.

Thipphavong, D. P., Apaza, R., Barmore, B., Battiste, V., Burian, B., Dao, Q., Feary, M., Go, S., Goodrich, K. H., Homola, J. & others (2018). Urban air mobility airspace integration concepts and considerations Anais do 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, p. 3676.

Wang, Z., Schaul, T., Hessel, M., Hasselt, H., Lanctot, M. & Freitas, N. (2016). Dueling network architectures for deep reinforcement learning Anais do International conference on machine learning, pp. 1995–2003.

APRENDIZADO DE MÁQUINA NÃO SUPERVISIONADO APLICADO À IDENTIFICAÇÃO DE SETORES DE ENTRADA EM ÁREA TERMINAL

Jean P. O. Lima*, Pollyanne E. Silva, Alef G. Quintanilha and Andre L. E. Melo
Airspace Control Institute - ICEA, Research Division

*** Corresponding author e-mail adress: jeanjpol@decea.mil.br**

PAPER ID: SIT2258

RESUMO

Aprimorar a eficiência do espaço aéreo é uma prioridade contínua na gestão do tráfego aéreo. Um indicador fundamental de desempenho nesse contexto é o tempo adicional gasto nas áreas terminais. Ao monitorarmos esse indicador de forma adequada, podemos tomar decisões que trarão benefícios tanto econômicos quanto ambientais. Um requisito para calcular esse indicador é identificar os setores de entrada na área terminal. Com base no cenário apresentado, o objetivo do estudo foi implementar um modelo para identificação automática de setores de entrada nas regiões a 40 NM (Milhas Náuticas) e 100 NM de distância de cada um dos quatro aeroporto mais movimentados do Brasil. Para isso, foram testados os métodos de aprendizado não supervisionado K-Means e DBSCAN, para a tarefa de clusterizar movimentos e, portanto, identificar regiões com maior densidade de entrada de voos em área terminal. A avaliação foi conduzida de forma qualitativa, levando em consideração a densidade de voos nas áreas terminais em comparação com os procedimentos de aproximação disponíveis nas cartas aeronáuticas dos aeroportos. Além disso, uma análise de ruído foi realizada, indicando a presença de ruídos entre 0,06% e 6,59% em cada setor, considerados como *outliers* ou movimentos atípicos. Esses resultados apontaram que os *clusters* foram bem identificados, mantendo um conjunto significativo de dados. As principais vantagens apresentadas neste artigo foram: a utilização de um modelo para identificação automática dos setores de entrada em área terminal, que, com um único conjunto de parâmetros, demonstrou robustez nos experimentos para os diferentes aeroportos, indicando a escalabilidade computacional da solução proposta; e a possibilidade de calcular o indicador de tempo adicional em área terminal de forma mais assertiva.

Palavras-Chave: Tráfego Aéreo, Setores Entrada, Área Terminal, DBSCAN, K-Means.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento do transporte aéreo tem acarretado sucessivos problemas de congestionamento e pontualidade, especialmente nos terminais de aeroportos movimentados. Isso tem ocasionado um aumento significativo nos custos operacionais das companhias aéreas como citado por Zhao et al. (2008). Logo, os estudos Xia et al. (2014) e Murça et al. (2018) revelam que o sistema de gerenciamento de tráfego aéreo (ATM) tem buscado desenvolver ferramentas e metodologias para monitorar e aprimorar a operação da aviação comercial, com o objetivo de atender às metas cada vez mais exigentes em termos de eficiência, segurança e impacto ambiental, além de lidar com o contínuo aumento do tráfego aéreo.

Nesse contexto, é fundamental realizar uma adequada mensuração e avaliação do desempenho a fim de identificar áreas passíveis de otimização, implementar medidas corretivas e embasar as tomadas de decisão. Diante disso, o Manual do Comando da Aeronáutica 100-22 (MCA 100-22) DECEA (2020) estabelece metodologias para medir o desempenho do sistema aéreo brasileiro em diversos aspectos, utilizando os Indicadores-Chave de Desempenho (KPIs).

Os padrões espaço-temporais em conjuntos de dados de trajetórias têm despertado cada vez mais interesse na literatura. Sabhnani et al. (2010) e Murça et al. (2018) citam que os estudos com técnicas de agrupamento têm sido empregados para identificar padrões de trajetórias em voo. Da mesma forma, a identificação de setores de entrada em área terminal pode resultar em melhorias no ATM, desempenhando um papel crucial na redução do consumo de combustível na aviação, como citado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2022), visto que essas melhorias podem levar a uma diminuição de 6% a 12% nas emissões CO_2 na aviação. Além disso, estudos de agrupamentos de setores podem aprimorar a mensuração do KPI-08, que refere-se à quantificação do tempo adicional nas áreas terminais.

No Brasil, o Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), para o cálculo do KPI-08, adota a prática de identificação de setores de área terminal realizando uma divisão do espaço aéreo em setores fixos de 60° em torno dos aeródromos. Por outro lado, na Europa, especialistas da Eurocontrol realizam periodicamente uma setorização manual, conforme citado no relatório do Desempenho Operacional do ANS, disponibilizado por Eurocontrol & DECEA (2022). A Figura 1 mostra o histograma dos movimentos em função do ângulo em relação ao aeroporto e os setores identificados segundo a metodologia do CGNA (Figura 1.a) e Eurocontrol (Figura 1.b).

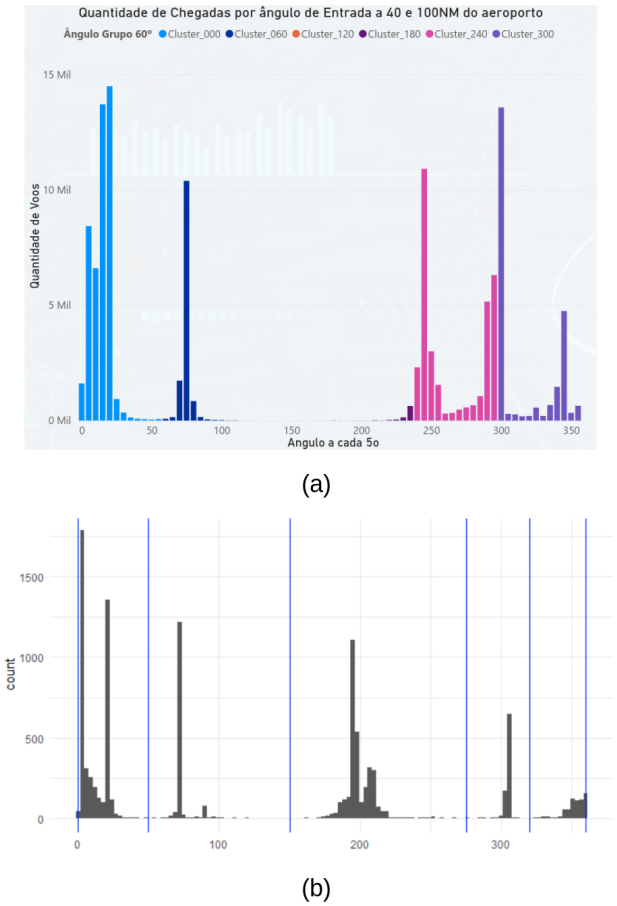


Figure 1 Identificação de setores de entrada em área terminal em Guarulhos (SBGR) de acordo com as metodologias do (a) CGNA e (b) Eurocontrol.

Fonte: Adaptado de Eurocontrol & DECEA (2022) e CGNA (2023).

A metodologia do CGNA, por realizar cortes fixos em ângulos de 60°, é facilmente replicável a demais aeroportos, entretanto possui uma precisão baixa quando comparado ao método da Eurocontrol. Na parte direita do histograma da Figura 1.a, por exemplo, podemos observar 3 picos de frequência que podem ser caracterizados como setores, entretanto apenas dois são identificados pela metodologia. A metodologia da Eurocontrol, entretanto, é mais precisa quanto a

identificação dos setores, porém, pelo fato de precisar de uma análise humana para cada aeroporto periodicamente, a aplicabilidade dessa solução torna-se difícil.

Estudos de agrupamentos possibilitam analisar a eficiência do tráfego aéreo ao combinar movimentos de acordo com a posição, velocidade e/ou proa. É importante mencionar que a identificação setores pode envolver alguns conceitos, como posição, velocidade e rota, a depender da aplicação, conforme citado por Guo et al. (2006). Diante disso, o presente estudo tem como objetivo propor um modelo para identificar automaticamente os setores de entrada em área terminal, considerando o raio de 40 NM e 100 NM em relação aos principais aeroportos do Brasil utilizando técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas informações referentes aos Dados Experimentais; Proposição de Modelos; e Métodos de Avaliação.

2.1. Dados Experimentais

Para o escopo deste trabalho, foram selecionados os Aeroportos de Guarulhos (SBGR), Congonhas (SBSP), Campinas (SBKP) e Brasília (SBBR). A seleção desses aeroportos ocorreu por registrarem os 4 maiores movimentos de pousos e decolagens no país em 2022 de acordo com o Anuário Estatístico, disponibilizado por CGNA (2023). O período de análise corresponde ao mês de agosto de 2022, por ser um período considerado pós-pandêmico na aviação, possuindo uma movimentação típica.

Os dados utilizados no estudo foram da Base de Dados ASMA (*Arrival Sequencing and Metering Area*), calculada a partir de dados de vigilância e mantida pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), composta pelas coordenadas geográficas de cada voo comercial apenas no instante da entrada em Áreas Terminais. Ressalta-se que, para este estudo, as áreas terminais foram simplificadas para círculos de 40 NM (C40) e 100 NM (C100) com centro em cada aeroporto, como sugerido na MCA 100-22 DECEA (2020).

O único pré-processamento adicional aplicado aos dados foi de padronização de escala baseado na média igual a 0 e desvios padrão igual 1 (Morettin & Bussab (2017)). A equação da padronização pode ser definida da seguinte forma:

$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

em que Z_i é o valor padronizado; x_i é cada valor observado; μ é a média; e σ o desvio padrão. A utilização da padronização ocorreu devido a dispersão dos dados, além de possibilitar construir bons modelos de representação para *clusters* de maneira invariante a localização, isto é, permitir a reutilização de parâmetros para vários aeroportos.

2.2. Proposição de Modelos

A base de dados foi utilizada para a condução de um aprendizado de máquina não supervisionado para a tarefa de clusterização. Assim, para cada aeroporto, foi treinado um modelo para cada círculo (C40 e C100), utilizando latitude e longitude dos voos, a fim de agrupá-los e identificar os setores de entrada nas áreas terminais. Foram selecionadas duas das principais técnicas de aprendizado não supervisionado: *K-Means*, Johnson & Wichern (2002); e DBSCAN, Ester et al. (1996), descritas a seguir.

O *K-Means* e DBSCAN (*Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) são dois algoritmos de aprendizado de máquina não supervisionado utilizados para tarefas de clusterização. O *K-Means* é um algoritmo de agrupamento baseado em centroides ou partição. Este algoritmo divide todos pontos do espaço amostral em K grupos de similaridade. A similaridade pode ser medida por uma métrica de distância Johnson & Wichern (2002). O DBSCAN, por outro lado, é um algoritmo baseado em densidade. A principal característica do algoritmo é que a vizinhança ponto a ponto em um *cluster* deve estar contida em um raio (ε) e cada *cluster* deve ter um número mínimo de pontos (*MinPts*). Além disso, o algoritmo indica ser extremamente eficiente na detecção de *outliers* e no

tratamento de ruídos Ester et al. (1996). O DBSCAN tem sido a principal escolha de algoritmo para tarefa de clusterização de voos quanto a dados de trajetória Murça et al. (2018).

Para o *K-Means*, o parâmetro K foi definido a partir do Método do Cotovelo, apresentado em Joshi & Nalwade (2013), em que o algoritmo foi executado repetidas vezes com K variando entre 2 e 10. O K que obteve o equilíbrio entre maior homogeneidade dentro do *cluster* e a maior diferença entre *clusters*, foi assumido como K ótimo.

Para o DBSCAN, os parâmetros definidos foram a distância máxima entre vizinhos de um *cluster* (ε) e o número mínimo de pontos (*MinPts*), que um conjunto precisa ter para ser considerado um *cluster*. Para estabelecer o ε foi utilizado a função *kNNdistplot* que exibe um gráfico de distância e para *MinPts* foi determinado o valor de 5% do total amostra.

2.3. Métodos de Avaliação

A avaliação dos resultados foi feita analiticamente, observando os *clusters* formados sobre C100 e C40 e comparando-os com os procedimentos de aproximação de acordo com as cartas aeronáuticas de cada aeroporto. Foram observados também os histogramas de voos por ângulo de entrada nas áreas terminais para cada aeroporto e comparado com os *clusters* formado a partir das coordenadas geográficas. Essa é uma importante visualização a fim de comparar com as metodologias atualmente utilizadas no CGNA e Eurocontrol (Figura 1). Além disso, foi feita uma análise de proporção de ruídos sobre os resultados do algoritmo DBSCAN.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados da clusterização dos setores de entrada em C40 e C100 para os aeroportos analisados utilizando os algoritmos K-Means e DBSCAN. As subseções estão organizadas da seguinte forma: Resultado da Clusterização, que apresenta os *clusters* identificados por ambos os métodos; Validação de Clusters, que mostra a comparação entre os *clusters* identificados com os procedimentos de aproximação de cada aeroporto; Análise de Ruído, que mostra a proporção de movimentos considerados ruídos em cada *cluster* apenas para o DBSCAN, visto que o método *K-Means* não possibilita esse tipo de análise; e Comparação com Trabalhos Relacionados.

3.1. Resultado da Clusterização

Os resultados para o *K-means* constam na Figura 2. Os histogramas exibem a distribuição de movimentos por ângulo em relação a cada aeroporto. Está assinalado também, por cores, os *clusters* resultantes do *K-Means*. O método *K-Means* clusterizou os movimentos dos aeroportos em até 6 *clusters*, seguindo o método do cotovelo, conforme a Tabela 1, que mostra a quantidade de *clusters* resultantes dos métodos K-Means e DBSCAN. O aeroporto SBKP foi o que apresentou o menor número de *clusters*, sendo $k = 3$ para C40.

Table 1 Número de *clusters* resultantes dos métodos *K-Means* e DBSCAN.

Aero.	K-Means		DBSCAN	
	Clusters (C40)	Clusters (C100)	Clusters (C40)	Clusters (C100)
SBGR	4	4	3	4
SBKP	3	5	4	4
SBBR	4	4	4	4
SBSP	6	4	3	4

A Figura 2 permite, ainda, identificar que alguns setores não foram alocados devidamente. Em C40 para SBKP, por exemplo, há a altas frequências em dois ângulos distintos (próximos a 45° e 120°), que sugere a existência de dois setores, entretanto o método identificou apenas um, bem como em C100 de SBSP, próximos a 320° e 355°. Além disso, percebe-se que o método é sensível a ruídos, por não conseguir identificá-los, como acontece em C40 de SBSP, no *cluster* assinalado pela cor vermelha, onde não há uma densidade alta para caracterizar um setor. Similarmente, próximo a 320° em C40 de SBSP, há apenas uma frequência que justifica a identificação de um setor, no entanto 3 setores foram identificados.

O número de *clusters* identificados pelo DBSCAN foi de 3 para C40 em SBGR e SBSP. Para os demais cenários, foram identificados 4 *clusters*. A Figura 3 apresenta uma distribuição

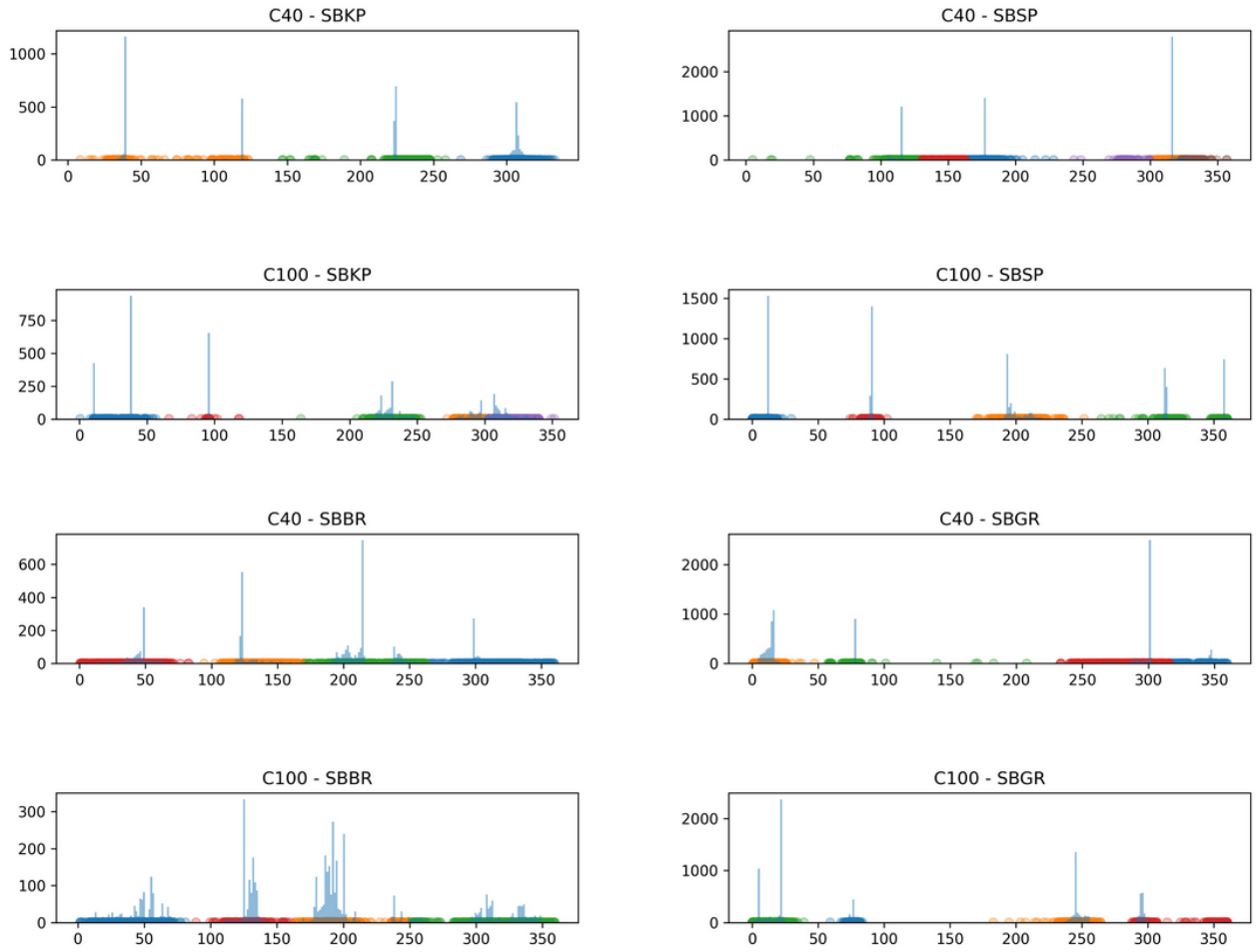


Figure 2 Distribuição de movimentos por ângulo em relação a cada aeroporto. As cores na parte inferior de cada histograma correspondem aos *clusters* identificados para os movimentos a partir do *K-Means*.

para a quantidade de *clusters*, identificados por cores na parte inferior dos histogramas, além de identificar os ruídos presentes na amostra, com a cor cinza. O DBSCAN mostrou-se eficaz na identificação dos setores, por considerar a densidade de movimentos para clusterização. Desta forma, os setores identificados são referentes aos ângulos com maior densidade de movimentos, enquanto movimentos em regiões com baixa densidade foram considerados ruídos.

Avaliando os resultados, foi possível observar que o método *K-Means* exibiu a maior quantidade de *clusters*, entretanto o método não mostrou-se eficaz, por não conseguir identificar movimentos com características atípicas, prejudicando assim a explicação dos *clusters*, o que levou a uma análise não precisa e não coerente com o esperado. O DBSCAN, por outro lado, mostrou-se preciso e explicável na identificação dos *clusters* e dos movimentos atípicos, considerados como ruídos. Isso ocorreu devido o método considerar não só a posição dos movimentos para a clusterização, mas também a densidade por setor.

3.2. Validação de *Clusters*

Para validar os resultados do DBSCAN, que obteve melhor desempenho na identificação dos setores, realizou-se uma análise georreferenciada. Essa análise permite comparar os setores identificados com os procedimentos de aproximação dos aeroportos, como mostra a Figura 4.

Na figura, as linhas azuis representam os procedimentos de aproximação disponíveis nas cartas dos aeroportos, enquanto as regiões coloridas simbolizam os movimentos clusterizados em C100 e C40, em que cada cor ilustra o setor a que cada voo foi clusterizado. Os procedimentos ilustram o conjunto de pontos de re-

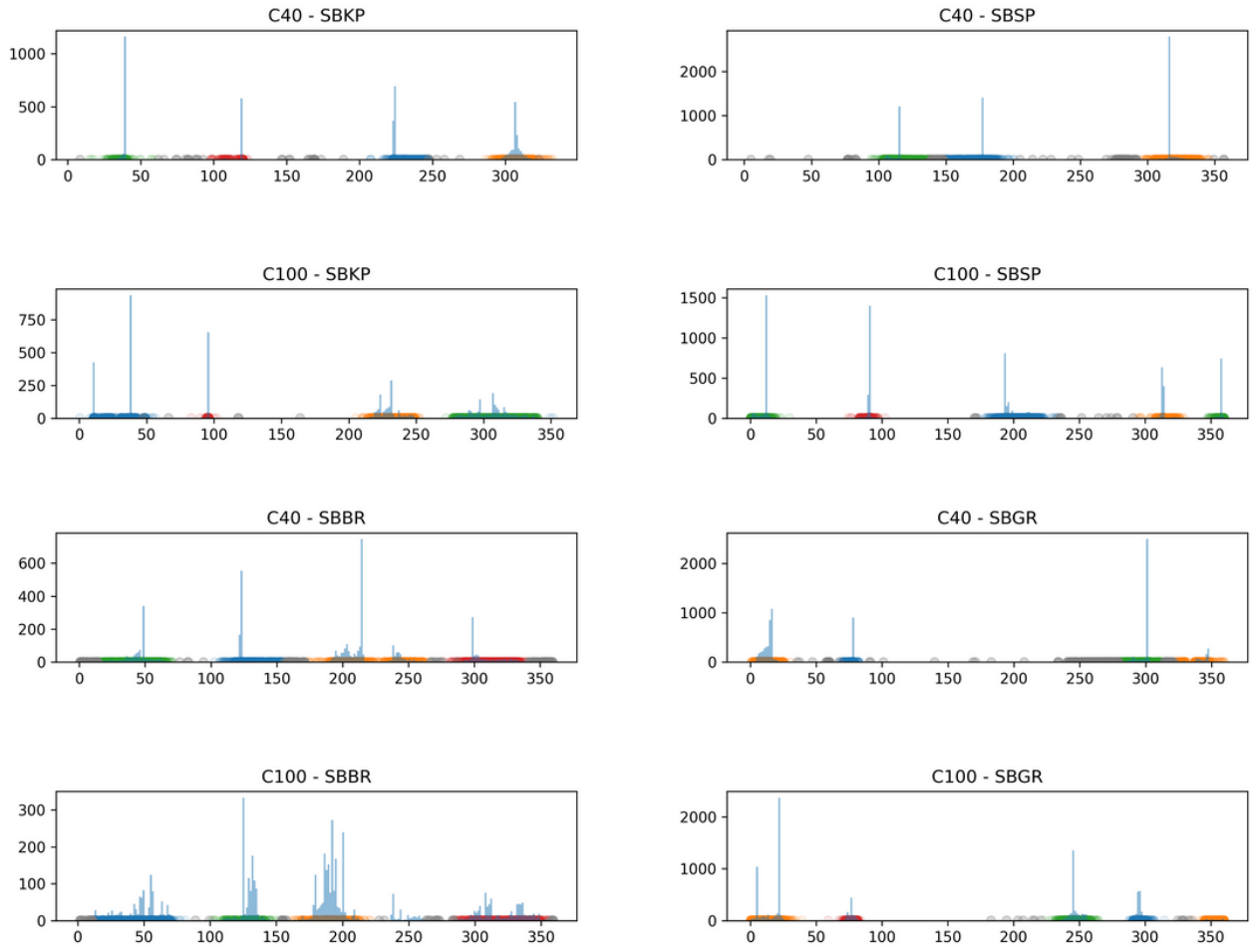


Figure 3 Distribuição de movimentos por ângulo em relação a cada aeroporto. As cores na parte inferior de cada histograma correspondem aos *clusters* identificados para os movimentos a partir do DBSCAN.

ferência para uma aeronave realizar uma manobra de aproximação ao aeroporto. Embora não seja obrigatório cada aeronave seguir sempre todos esses pontos de referência, esses procedimentos são importantes para validar empiricamente os *clusters* formados. Foi observado também o alinhamento entre os procedimentos e os setores identificados, o que valida o desempenho do método DBSCAN.

No geral, a identificação dos setores possibilitam análises mais assertivas em área terminal, o que pode contribuir para melhorias na capacidade do espaço aéreo; redução no atraso dos voos; e na estimação de indicadores de performance, como o KPI-08, mais confiáveis. Além disso, o método utilizado para identificação de setores de entrada em área terminal demonstrou-se computacionalmente escalável, utilizando os mesmos parâmetros para todos aeroportos, o que possibilita a aplicação da solução em outros cenários sem a necessidade de reajuste de parâmetros.

3.3. Análise de Ruído

O DBSCAN se mostrou robusto em relação aos ruídos, o que permitiu uma clusterização mais precisa dos setores. Ao aplicar o DBSCAN, os setores foram agrupados com base na densidade de voos em cada região. Isso significa que regiões com maior densidade de voos foram agrupadas em *clusters*, enquanto regiões com menor densidade de voos foram consideradas ruídos ou movimentos atípicos.

A Tabela 2 mostra as quantidades de movimentos que cruzaram C100 e C40 e as respectivas proporções de ruído, identificado pelo DBSCAN, para cada um dos aeroportos estudados. Foram identificados de 0,06% a 6,59% de ruídos nos dados de C100 e C40. Embora a proporção de ruídos não seja impactante para o estudo, é sufici-

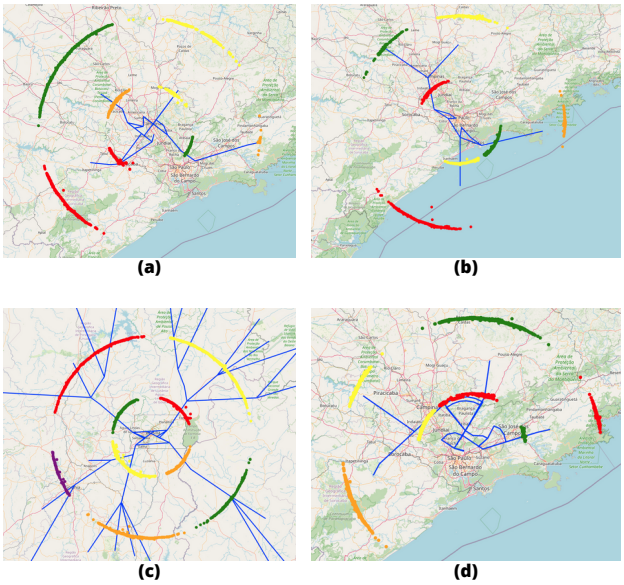


Figure 4 Movimentos clusterizados em C100 e C40 em (a) SBKP; (b) SBSP; (c) SBBR; e (d) SBGR. As linhas em azul indicam os procedimentos de pouso de acordo com as cartas dos aeródromos.

ente para prejudicar o desempenho do K-Means. O reconhecimento do ruído pelo DBSCAN faz melhorar a identificação dos *clusters*, preservando ainda um conjunto de dados significativo.

A capacidade do DBSCAN de separar ruídos da análise é uma vantagem expressiva em comparação ao K-Means. O K-Means torna-se menos eficaz por não considerar os movimentos atípicos em grupos distintos, levando a resultados não adequados. Portanto, o uso do DBSCAN na clusterização dos setores de entrada em C40 e C100 mostrou-se acurado e eficaz.

3.4. Comparação com trabalhos relacionados

Comparando o desempenho do método DBSCAN com os métodos aplicados pelo CGNA e Eurocontrol, podemos concluir que o método proposto foi capaz de identificar os setores com a precisão esperada, além de encontrar achados similares com aos resultados da Eurocontrol. Entretanto, o método proposto dispensa a utilização de um indivíduo para a identificação de setores, ao contrário da Eurocontrol, agregando a eficiência na execução do método e permitindo que ele seja replicado e escalado para outros cenários.

A metodologia implantada pelo CGNA, por sua vez, não se mostrou ajustável na identificação de setores, pois realiza a divisão por ângulo fixo de 60°, não considerando variáveis como densidade de movimentos e posicionamento das aeronaves para a identificação dos setores.

Um outro detalhe importante de ressaltar é que o modelo proposto considera, por voo, um único ponto em área terminal, pertencente a C100 e C40, para realizar a clusterização. Isso implica em a eficiência do algoritmo ser proporcional ao número de movimentos. O mesmo não ocorre em trabalhos de clusterização de fluxo, por exemplo, que levam em consideração as trajetórias completas do voo, como em Murça et al. (2018). Nesse caso, a complexidade computacional aumenta consideravelmente, uma vez que a solução passa a ser proporcional ao número de pontos das trajetórias dos voos analisados, sendo esses dados provenientes de bases de vigilância, que têm taxa de atualização na ordem de segundos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo realizou a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina não supervisionado, pelos métodos *K-Means* e DBSCAN, para a tarefa de clusterização de setores de entrada em área terminal nos aeroportos SBBR, SBKP, SBSP e SBGR. O DBSCAN obteve melhores resultados em comparação ao *K-Means*, devido o método considerar a densidade dos movimentos para a identificação dos setores, além de identificar os movimentos atípicos, considerando-os como ruído, o que não ocorre com o *K-Means*.

O DBSCAN também possibilitou a utilização dos mesmos parâmetros independente do raio do círculo (C40 e C100) e do aeroporto, tornando-se eficiente do ponto de vista da implantação da solução. Além disso, foi feita uma análise de ruído na amostra, que identificou uma proporção média de 4,13% e 1,71% para C40 e C100, respectivamente. O que não tem impacto para o estudo, porém influencia negativamente o desempenho do *K-Means*.

O método DBSCAN pode auxiliar na identificação de padrões e características comuns entre os setores de entrada, permitindo uma melhor compreensão da distribuição de fluxo de aeronaves nos aeroportos; otimização dos processos

Table 2 Proporção de Ruídos nas amostras de movimentos.

Aeroporto	Movimentos C40	Ruídos - C40	Movimentos C100	Ruídos - C100
SBGR	7142	166 (2,32%)	7901	7 (0,09%)
SBKP	4618	11 (0,24%)	4922	3 (0,06%)
SBBR	4080	161 (3,99%)	4066	268 (6,59%)
SBSP	5806	56 (0,96%)	6198	5 (0,08%)

de planejamento e gerenciamento; e na estimação do KPI-08 de maneira mais confiável e assertiva.

Os achados mostraram-se superiores às soluções utilizadas pelo CGNA e Eurocontrol. Isso se deu pelo fato da metodologia proposta realizar a identificação dos setores automaticamente, sem a necessidade de intervenção humana, ao contrário da Eurocontrol, e levando em consideração a densidade de movimentos, ao contrário do CGNA.

Para trabalhos futuros, sugere-se utilização e comparação com outros métodos de aprendizado não supervisionado; testes com outros aeródromos, a fim de validar o método em outros cenários; e validar estatisticamente a explicabilidade dos setores encontrados. Sugere-se também comparar o desempenho da clusterização apresentada neste trabalho, que utiliza apenas um ponto da trajetória por voo, com trabalhos baseado na trajetória completa, para verificar se há uma diferença significativa no resultado da clusterização, ainda que a performance computacional deste trabalho mantenha-se superior. Por fim, é importante ressaltar que a identificação dos setores de entrada na área terminal pode ser uma tarefa complexa e exigir a colaboração de diferentes partes interessadas, incluindo serviços de navegação aérea e controladores de tráfego aéreo.

Referências

CGNA (2023). Anuário estatístico de tráfego aéreo 2022, Departamento de Controle do Espaço Aéreo.

DECEA (2020). Metodologia de indicadores atm do sisceab, Manual do Comando da Aeronáutica - MCA 100-22.

Ester, M., Kriegel, H., Sander, J. & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Vol. 96 pp. 226—231.

Eurocontrol & DECEA (2022). Brazil/europe comparison of operational ans performance, Eurocontrol e Departamento de Controle do Espaço Aéreo.

Guo, J., Qin, Z., He, S. & Huang, H. (2006). Simulation of space group formation for maneuvering target, Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh/Journal of Xi'an Jiaotong University 40, 1378–1382.

Johnson, R. & Wichern, D. (2002). Applied Multivariate Statistical Analysis, Prentice Hall,.

Joshi, K. D. & Nalwade, P. S. (2013). Modified k-means for better initial cluster centres, International Journal of Computer Science and Mobile Computing. 2-7, 219–223.

Morettin, P. A. & Bussab, W. O. (2017). Estatística básica, Saraiva Educação SA,.

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.

Sabhnani, G., Yousefi, A. & Mitchell, J. S. (2010). Flow conforming operational airspace sector design Anais do 10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, p. 9377.

Xia, Q., Li, X., Song, Y. & Zhang, B. (2014). Aircraft grouping based on improved divisive hierarchical clustering algorithm, Journal of Air Transport Management 40, 157–162.

Zhao, T., Man, Z., Wan, Z. & Bi, G. (2008). A cgs-msm parallel genetic algorithm based on

multi-agent Anais do 2008 Second International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, pp. 10–13.

CAPACIDADE DE PISTA DINÂMICA: FATORES A SEREM CONSIDERADOS NA METODOLOGIA BRASILEIRA

James Gomes Lima
Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo – CINDACTA I

jamesjgl@fab.mil.br

PAPER ID: SIT2233

RESUMO

O Sistema de Pistas constitui um dos componentes da Infraestrutura Aeroportuária de relevância na determinação da viabilidade operacional de um aeroporto, no número de operações que o aeródromo poderá suportar sem trazer impactos aos setores de controle de tráfego aéreo; além de representar importante elemento definidor do acesso de companhias aéreas ao mercado aeroportuário brasileiro. A capacidade do sistema de pistas possui distinção ímpar no campo das Relações Internacionais, agregando algumas de suas teorias e realçando o papel do Brasil como principal protagonista na eficiência da Aviação Civil, perante outros membros da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO). Ademais, diante do processo de concessões de alguns aeroportos, ditado pelo governo brasileiro, buscando o uso eficiente da infraestrutura aeroportuária e a competitividade do mercado aeroportuário, o incremento da capacidade de pista não deve ser encarado tão somente sob a ótica do ente privado e do lucro advindo das operações extras através da absorção de mais companhias aéreas, mas também como política pública. Ocorre que a possibilidade de majoração da Capacidade do Sistema de Pista tem sido fórum de debates incessantes, questiona-se se alguns dos aspectos da metodologia atualmente empregada têm sido um dos fatores restritivos ao ingresso ao mercado aeroportuário brasileiro. Busca-se por meio deste trabalho contextualizar o leitor acerca da metodologia brasileira da capacidade de pista e dos aspectos considerados na metodologia européia e americana sobre o assunto.

Palavras-chave: Capacidade de Pista. Mercado Aeroportuário. Metodologia da Capacidade de Pista.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é enumerar aspectos a serem considerados no cálculo da capacidade do sistema de pistas, que permitam o atendimento da demanda variável por um determinado tipo de operação – pouso ou decolagem – nos aeroportos brasileiros, seja diante da perspectiva de crescimento da demanda pelo transporte aéreo, seja em momentos de crises no setor que provoca a concentração de voos em horários mais específicos. Neste sentido, busca-se lançar luz ao leitor acerca da metodologia brasileira da capacidade do sistema de pista, conforme o Manual do Comando da Aeronáutica (MCA) 100-14 e, indicar aspectos considerados nas metodologias européia e americana de capacidade de pista.

Utilizaremos a partir daqui o termo pista ou sistema de pistas como "área retangular definida em um aeródromo em terra, preparada para pousos e decolagens de aeronaves" (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 2012, p. 12).

O Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) é a Organização Militar subordinada ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) que tem por missão: "a harmonização do gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo e das demais atividades relacionadas com a navegação aérea, proporcionando a gestão operacional das ações correntes dos processos de Gerenciamento do Tráfego Aéreo (ATM) e de infraestrutura relacionada, visando à suficiência e à qualidade dos serviços prestados no âmbito do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB)". (BRASIL, 2017).

De competência do CGNA incluem várias medidas com impacto direto na Circulação Aérea Geral (CAG), isto é, aviação comercial e aviação geral. Desta forma, monitoramento de inoperâncias dos auxílios à navegação aérea, gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, gerenciamento do espaço aéreo, análise de intenções dos voos comerciais, análise de impactos à CAG por conta de grandes eventos, cálculo da capacidade pista e de setores do espaço aéreo, processo de decisão colaborativa com participação de representantes de companhias aéreas e da administração aeroportuária, entre outros são algumas das ações empregadas por esta importante Organização do SISCEAB com o intuito de manter o fluxo de tráfego aéreo seguro, ordenado e eficiente.

Entre os desafios enfrentados pelo CGNA está o cálculo da capacidade de pista, que representa o número de operações de pouso e de decolagem por hora suportável em um determinado aeroporto do país que leva em consideração a capacidade dos setores do espaço aéreo, principalmente a dos setores de aproximação e de decolagem.

2. METODOLOGIA BRASILEIRA DE CAPACIDADE DE PISTA

O Manual do Comando da Aeronáutica (MCA)100-14 prevê que a metodologia aplicável para o cálculo da capacidade do sistema de pista de qualquer aeródromo no país deve levar em consideração que a cada duas operações de pouso há uma decolagem, desta forma há o equilíbrio entre as operações, de forma que 50% das operações serão de pouso e os outros 50% das operações, de decolagem. Aliado ao balanceamento entre pousos e decolagens, a capacidade de pista praticada em geral está limitada a 80% da capacidade horária máxima de um aeroporto. Os 20% restantes estão reservados às demandas táticas, com parâmetros imprevisíveis, como o atendimento a voos alternados e possíveis contingências tais como: condições meteorológicas adversas no aeroporto de destino, voos de emergência; além de voos da aviação geral e voos militares.

A premissa supracitada, chamada de Capacidade Teórica de Pista, admite uma capacidade do sistema de pista máxima única durante toda a operação em um aeródromo, não fazendo a distinção na vocação do aeroporto, além da tendência em determinados horários de maior número de operação de pouso ou de decolagem, isto é, desequilíbrio entre as operações.

Verifica-se que o valor da capacidade de pista serve de subsídio para vários setores dentro do CGNA e fora deste Centro, com impactos diretos inclusive na viabilidade operacional do aeroporto. É a capacidade de pista que indicará se um aeroporto está saturado ou não, isto é, operando além dos seus limites da infraestrutura disponível; impactará diretamente no espaço aéreo; determinará a aprovação de solicitações de

mais voos de companhias aéreas em um aeroporto; constituirá elemento de decisão durante a operação tática se determinado voo sofrerá medidas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, entre outras ações. A capacidade do sistema de pista constitui um dos parâmetros adotados pela ANAC para aprovação do acesso de companhias aéreas estrangeiras no território brasileiro por ocasião da Conferência de *Slots*. Esta representa o maior evento da IATA, ambiente que congrega companhias aéreas associadas e não associadas em todo o mundo, cuja finalidade é proporcionar fórum para a alocação de faixas horárias (*slots*) nos aeroportos inteiramente coordenados, além da obtenção de consenso nos ajustes de horários necessários em conformidade com as limitações de capacidade dos aeroportos.

Ocorre que a distribuição entre pousos e decolagens possui comportamento irregular de acordo com o horário de operação de um aeroporto, um exemplo no aeroporto de Guarulhos, o mais movimentado do país em termos de voos internacionais, verifica-se pela manhã um grande fluxo de pousos de aeronaves oriundos da América do Norte, da América do Sul e da Europa, que exigiria mais emprego da infraestrutura aeroportuária para as operações de pouso do que de decolagem; o movimento contrário comprova-se no horário noturno. Admitir uma distribuição igual entre pousos e decolagens no aeroporto seria aceitar que o comportamento da demanda para determinado aeroporto é a mesma em todo o seu horário de funcionamento.

Pretende-se aqui introduzir um conceito até então novo no Brasil, mas reconhecido pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), dentro das suas recomendações dirigidas aos seus Estados membros. Passaremos a adotar o conceito de **Capacidade de Pista Dinâmica**, como aquela que propicia a adaptação da capacidade à demanda prevista para alguns horários e que permite variarmos a relação entre o número de operações de pouso ou de decolagem além da distribuição equânime, dentro da concepção ampla de manutenção da segurança operacional.

O tema em tela tem sua importância, primeiramente por repercutir diretamente em resultados práticos, diante da nova realidade de incremento da demanda em horários específicos na operação de um aeródromo. Ademais, essas ações corroboram com o aumento no acesso ao mercado aeroportuário brasileiro, o que reflete em ganhos em termo econômico e em reforço da relação do Brasil com os diversos atores transnacionais.

A concepção da Capacidade de Pista Dinâmica não tem o condão de negar a metodologia atualmente aplicada, mas a esse entendimento acrescenta um novo olhar, diante da necessidade de atendimento à demanda e uso eficiente da infraestrutura disponível. Busca-se promover assim o desenvolvimento do setor de aviação civil, fundamental para o desenvolvimento econômico e social do país e importante no atendimento às necessidades complementares do setor aeroportuário.

3. ASPECTOS CONSIDERADOS NA METODOLOGIA BRASILEIRA DE CAPACIDADE DE PISTA

Quanto ao método de cálculo da capacidade de pista, previsto no MCA 100-14, assume-se o preceito de uma operação de decolagem entre dois pousos consecutivos, mantendo os mínimos de separação regulamentar definidos no ICA 100-37 (Serviços de Tráfego Aéreo). A capacidade da pista é estimada para um intervalo de 60 minutos em função dos tempos médios de ocupação das pistas.

Segundo o MCA 100-14, para determinar a capacidade do conjunto de pistas, os seguintes aspectos devem ser considerados: Fatores de planejamento e Fatores relacionados às operações de pouso e decolagem.

E continua: […]“Os fatores de planejamento são elementos utilizados para a simplificação dos modelos matemáticos, ou dos aspectos operacionais, que influenciam na determinação da capacidade do sistema de pistas. Os mais comuns aplicados são: a) Condições ideais de seqüenciamento e coordenação do tráfego aéreo; b) Considera-se que todo o pessoal tem o mesmo treinamento e o mesmo desempenho operacional; c) Todos os auxílios à navegação e auxílios visuais são considerados tecnicamente e operacionalmente sem restrições; e d) Todos os equipamentos de comunicação (VHF / telefonia) considerados operacionais estão operando normalmente”. (BRASIL, 2015, p. 13)

O MCA 100-14 elenca os seguintes fatores relacionados às operações de pouso e decolagem: a) Tempo médio de ocupação da pista; b) *Mix* de aeronaves; c) Percentual de utilização das cabeceiras; d) Comprimento do segmento de aproximação final; e) Separação mínima regulamentar de aeronaves; f) Velocidade de aproximação final; e g) Utilização ou não de equipamento radar. (BRASIL, 2015, p. 13)

4. ASPECTOS CONSIDERADOS NA METODOLOGIA EUROPÉIA DE CAPACIDADE DE PISTA

A capacidade de pista na Europa é conduzida pela Unidade Aeroporto do EUROCONTROL como parte do suporte dado pelo *Network Manager* este, por seu turno, é responsável pelo gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, gerenciamento do risco e contingências, relatório e análise pós-operacional, dentre outros serviços prestados a 43 países, com o objetivo de conduzir gerenciamento de tráfego aéreo europeu e de promover o conceito *Single European Sky*, isto é, Céu Único Europeu.

A diretriz para cálculo da capacidade de pista aplicada na Europa está consubstanciada no Manual de Metodologia de Avaliação da Capacidade de Pista (ACAM *Manual*), que declara não haver um método único de determinação da capacidade de pista, desde que leve em consideração todos fatores relevantes em sua avaliação, incluindo "impactos ambientais, resiliência, fatores comerciais e fatores econômicos" (*Network Manager*, 2016, p. 1). O que nos permite inferir que, muito embora haja um guia único, fatores de ordem local podem interferir na metodologia de capacidade de pista empregada.

O ACAM Manual define, de modo geral, capacidade como o "número máximo de movimentos sustentado por unidade de tempo que pode ser aceito durante fatores diferentes de capacidade local" (NETWORK MANAGER, 2016, p. 9, tradução nossa). Porém, dados os benefícios distintos advindos do cálculo da capacidade de pista às partes interessadas e, buscando evitar possíveis más interpretações, o Network Manager estabeleceu três diferentes definições de capacidade em função do tempo, são elas: Capacidade Estrutural – Estratégia Macro; Capacidade Planejada – Estratégica e Capacidade Operacional – Pré-tática.

A Capacidade Estrutural é "centrada nas necessidades de um aeroporto para determinar o que a infraestrutura é capaz, em princípio, e se deveria ou quando deverá iniciar o processo de atualizações de infraestrutura e, portanto, está no horizonte de tempo plurianual" (NETWORK MANAGER, 2016, p.14, tradução nossa), normalmente compreende um horizonte de 2 a 5 anos e, "desconsidera certas restrições que são difíceis de estimar em horizontes de longo prazo no futuro" (NETWORK MANAGER, 2016, p.14, tradução nossa).

Capacidade Planejada, não diferente da concepção brasileira, é calculada em princípio antes do processo de distribuição de slots a cargo da IATA, durante as Conferências de Slots, ocorridas duas vezes ao ano, para a definição da demanda para os principais aeroportos, normalmente os mais congestionados, nas temporadas verão e inverno do hemisfério norte. Esta capacidade deve ser verificada principalmente pelos aeroportos coordenados, isto é, aqueles em que todos os horários de operações são planejados através de uma demanda conhecida, e previamente definida através de acordos entre AAL, companhias aéreas e autoridades da aviação civil com a distribuição de slots. Esta capacidade abrange um horizonte de cerca de 18 meses antes das respectivas temporadas e, servem de dados de demanda a serem considerados nos planejamentos estratégicos e pré-táticos de gerenciamento de fluxo.

E, finalmente, a Capacidade Operacional que representa:[...]"a avaliação de capacidade mais detalhada realizada no dia antes e no dia das operações. Seu objetivo é integrar as últimas informações detalhadas de restrição para atualizar os valores de capacidade. É usado por todos os aeroportos para refinar quaisquer planos de balanceamento de demanda identificados ou planos de contingência. A Capacidade Operacional também é um dado crítico dentro da fase tática de processo de gerenciamento de fluxo" (NETWORK MANAGER, 2016, p. 15, tradução nossa).

A Capacidade Operacional foi acrescentada na última versão do Doc 9971, a terceira edição de 2018, que assim assevera: "Além das

capacidades declaradas para aeroportos e espaços aéreos (e a capacidade associada ao processo estratégico de slot aeroportuário), os serviços de ATFM exigem conhecimento da capacidade operacional. A capacidade operacional é a capacidade esperada associada à situação tática no aeroporto ou no espaço aéreo. Fatores dinâmicos, incluindo meteorológicos condições, status do CNS, combinação de frota e pessoal podem resultar em uma capacidade operacional inferior à capacidade declarada. As soluções ATFM (ver Parte II, Capítulo 4) baseiam-se na capacidade operacional dinâmica esperada" (INTERNACIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2018, p. II-3-2, tradução nossa).

O que explica de certa maneira o alcance dos objetivos deste trabalho e seu alinhamento aos objetivos vislumbrados pela ICAO.

5. ASPECTOS CONSIDERADOS NA METODOLOGIA AMERICANA DE CAPACIDADE DE PISTA

A FAA é a agência americana responsável por regular, conceder licenças e certificados, fomentar pesquisas e prover treinamentos em todos os aspectos aos usuários da aviação civil nos Estados Unidos.

A metodologia americana acerca da capacidade de pista é descrita na Advisory Circular (AC) 150/5060-5, Capacidade Aeroportuária e Atraso, que, ao que consta em seu próprio documento, segue em sua última versão de 1995 pode, portanto, estar em descompasso com alguns dos últimos conceitos e técnicas aplicados na aviação (NETWORK MANAGER, 2016, pag. 17). Contudo, dada a necessidade de atualização da capacidade aeroportuária, com as novas tendências do ramo, técnicas de modelagem aprimoradas e novas pistas que têm sido adicionadas ao sistema americano, a FAA emitiu em 2014 a última atualização do Airport Capacity Benchmark Report (Relatório de Referência de Capacidade Aeroportuária) que, constitui um relatório de referência em termos de capacidade aeroportuária, como parte do esforço daquela Agência para avaliar as características de capacidade dos aeroportos mais movimentados do país. Este Relatório alerta que métodos mais sofisticados de avaliação de capacidade estão sendo utilizados pela FAA, de tal forma que a AC, muito embora seja uma fonte primária usada para calcular capacidade para todos os tipos de aeroportos, ela é somente uma orientação formal no assunto.

A metodologia padrão e que serve como ponto de partida na determinação da capacidade aeroportuária e descrita na AC 150/5060-5, conta com o layout mais comum observados nos aeroportos americanos (ao todo são apresentadas 19 configurações de pistas); busca-se através deste método, conhecido como Tabelas de Consulta, que os planejadores de aeroportos escolham uma ou mais tabelas de consulta que combinam melhor com o layout de pista do aeroporto em estudo (Figura 1).

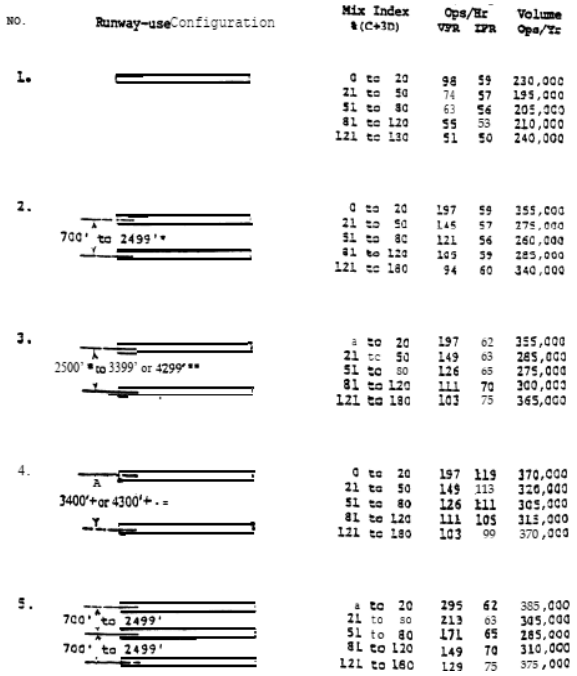


Figura 1 - Capacidade conforme alguns exemplos de configuração do sistema de pistas. **Fonte:** Federal Aviation Administration (1995)

Um outro método apresentado na AC e mais refinado que o anterior, baseia-se em cartas, nomógrafos e planilhas, indicado para aeroportos menores, com configurações de pista simples. Este método apresenta a capacidade estimada para 43 configurações de pista e combinações meteorológicas representativos dos principais aeroportos americanos. A capacidade horária é obtida da fórmula:

Capacidade de Pista = C* x T x E, onde "C*" é a capacidade horária base, "T" representa a

porcentagem de toques e arremetidas durante operação IFR e VFR e, “E” caracteriza o fator de saída, isto é, a localização das taxiways de saída, medida da cabeceira à aproximação final da pista.

Segundo Leighfisher (2012, p. 35, tradução nossa) “para calcular a capacidade de pista por hora, este método requer a seleção da melhor representação das configurações de teto, visibilidade a partir de um diagrama de várias configurações de uso de pista. O usuário deve então encontrar os gráficos ou nomógrafos correspondentes para o caso selecionado”. A figura 2 ilustra a aplicação do método para determinada pista e condição meteorológica.

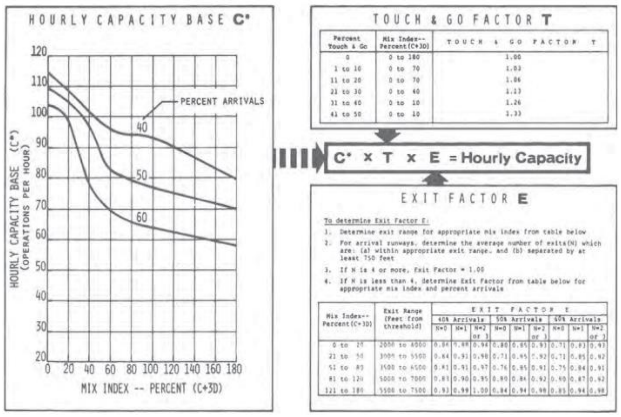


Figura 2 - Método cartas/namógrafos. **Fonte:** Federal Aviation Administration (1995)

Verifica-se que a metodologia norte-americana se baseia em uma grande quantidade de dados estatísticos coletados por muitos anos, proporcionando um desempenho muito bom em cenários americanos em termos de capacidade teórica e atual.

A AC dedica capítulo especial para apresentar outros métodos aprimorados a partir de modelos de simulação computacional para cálculo da capacidade de pista e de atrasos médio por aeronave, são eles: SIMMOD (Airport and Airspace Simulation Model); ADSIM (Airfield Delay Simulation Model) e ACM (Airfield Capacity Model). Vários outros métodos mais sofisticados foram desenvolvidos e são aplicados para o cálculo da capacidade de pista a partir de inúmeras variáveis de entrada como: performance de aeronaves, fatores humanos, geometria do sistema de pista, requisitos de separação entre aeronaves, dentre outras.

6. QUADRO COMPARATIVO

As características de cada metodologia são apresentadas a seguir:

Tabela 1 - Metodologias de Capacidade de Pista

Metodologia	Órgão ATM	Órgão ATFM	Norma	Métodos de cálculo da Capacidade de Pista
Europeia	EUROCONTROL	NMOC	ACAM Manual	Dados históricos de performance; Modelos analíticos e planilhas; modelos baseados em simulação
Americana	FAA	ATCSCC	AC 150/50 60-5	Tabelas de Consulta; Métodos de cartas/mamógrafos; Modelos de simulação (SIMMOD, ADSIM e ACM)
Brasileira	DECEA	CGNA	MCA 100-14	Modelos analíticos e planilhas

7. CONCLUSÃO

A análise conjugada das metodologias de capacidade de pista empregadas pela EUROCONTROL e FAA permite-nos estabelecer critérios que poderão ser considerados na metodologia brasileira potentes a estebelecer a capacidade de pista dinâmica para os aeroportos do país.

Assim, o conceito de capacidade teórica de pista inviabilizado em avaliar o cenário operacional apresentado como, por exemplo, a meteorologia desfavorável, pode acrescentar conceitos como a capacidade operacional, uma vez que esta busca integrar as últimas informações detalhadas de restrição para atualizar os valores de capacidade, consequentemente há a possibilidade de refinar quaisquer planos de balanceamento de demanda identificados ou planos de contingência, o que alinha para os critérios empregados na metodologia européia.

Ademais, a definição dos índices de atrasos úteis para o estabelecimento da capacidade de pista nos horários mais congestionados pode ser útil. Neste caso, inclina-se para o conceito de capacidade de pista mais próxima ao adotado na metodologia americana: "medida da capacidade prática definida como número máximo de operações que resulta em um atraso médio máximo especificado" (LEIGHFISHER, 2012, p. 3, tradução nossa). Desse modo, teremos uma capacidade para planejamento aeroportuário e de política estratégica de Estado, outra aplicáveis às *Slot Conferences* e uma outra, sujeita às mudanças dinâmicas táticas, ao que a ICAO e o método europeu definem como Capacidade Operacional.

Vislumbra-se a aplicação da capacidade de pista dinâmica associada aos efeitos dinâmicos verificados durante a operação tática de um aeroporto. Assim, ganha relevo a influência na capacidade de pista das condições meteorológicas durante a operação de um aeroporto; do fator humano associada à habilidade dos controladores de voo e dos pilotos na redução do tempo de ocupação de pista; do monitoramento constante por parte da Administração Aeroportuária e dos gerentes de fluxo de tráfego aéreo quanto à precisão dos estimados de calços fora, fruto da decisão conjunta em processo de tomada de decisão a nível de aeroportos (A-CDM).

8. REFERÊNCIAS

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Portaria DECEA n° 78/DGCEA, de 23 de março de 2015. Aprova a reedição do MCA 100-14, Manual que trata da "Capacidade do Sistema de Pistas". Boletim do Comando da Aeronáutica, Rio de Janeiro, n. 070, de 15 de abril de 2015.

FEDERAL AVIATION DMINISTRATION. Airport capacity and delay. Advisory Circular. AC 150/5060-5, 1995.

FEDERAL AVIATION DMINISTRATION. Airport Capacity Benchmark Report 2004. Disponível em: http://www.faa.gov/airports/planning_capacity/profiles.

ICAO. Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management. Doc. 9971. Montreal, Third Edition, 2018.

LEIGHFISHER, F. et al. Evaluating Airfield Capacity. Washington D.C. Transportation Research Board, 2012.

NETWORK MANAGER. ATFCM Users Manual. Brussels, EUROCONTROL. Edition 23.0, 2019.

NETWORK MANAGER. Airport Capacity Assessment Metodology – ACAM Manual. Brussels, EUROCONTROL. Edition 1.1, 2016.

EFICIÊNCIA DOS TERMINAIS DE CARGA AEROPORTUÁRIOS: UMA ANÁLISE CONSIDERANDO O E-COMMERCE

Wellington Luiz Rocha da Silva Filho, Viviane Adriano Falcão, Marcelo Xavier Guterres, João Basílio Tarelho Szenczuk
Instituto Tecnológico de Aeronautica, Department (optional)

wellington.filho@ga.ita.br

PAPER ID: SIT2263

RESUMO

As concessões aeroportuárias no Brasil iniciaram em 2011, com o objetivo de suprir gargalos na infraestrutura e possíveis investimentos frente ao crescimento de movimentação de passageiros e cargas. O comércio eletrôncio (*e-commerce*) por sua vez foi um segmento fundamental para o crescimento na movimentação de cargas no Brasil. Adicionalmente, até 2021, quarenta e quatro aeroportos passaram a ser administrados por iniciativas privadas, visando uma melhoria da eficiência operacional, de forma a gerar maior movimentação de cargas e passageiros, maior satisfação dos passageiros e consequentemente maiores receitas para as operadores aeroportuárias. Apesar disso, pouco se foi estudado a respeito da melhoria de eficiência nos terminais de carga aeroportuários do Brasil após a concessão, sendo esse um dos objetivos do presente estudo. Para a determinação da eficiência, a Análise Envoltória de Dados (DEA) – *Window Analysis* foi aplicada em dois cenários, o primeiro considerando como *output* do modelo toda moviementação de carga que passaram nos terminais aeroportuários, e o segundo considerando apenas a movimentação do *e-commerce*, com o objetivo de entender se as concessionárias influenciaram eficiência operacional dos terminais, visto que foi empregado o *DEA – Window Analysis* e verificar qual foi o comportamento quando aplicou-se apenas o comércio eletrônico como *output* do modelo, segmento com grande destaque.

Palavras Chaves: Eficiência, E-commerce, Terminal de cargas, Análise Envoltória de Dados (DEA), Concessões.

RECONHECIMENTOS

If applicable, insert here the acknowledgements. In the next pages any information that could potentially uncover the authors identity may be provided. Before uploading the PDF file of the article, please remove all the properties (metadata) of the file as names, etc.

2. INTRODUÇÃO

As receitas com transporte aéreo tinham o seu valor associado ao transporte de passageiros, enquanto os demais modos de transporte de utilização humana, desde veículos à tração animal até transporte marítimos, sempre tiveram no transporte de carga sua maior rentabilidade financeira (Tozi et al., 2010). No entanto, por volta de 1950 a movimentação de carga por meio aéreo passou a ser considerada uma fonte de obtenção de receita para as companhias aérea, mesmo que ainda como subproduto do negócio de passageiros, e somente em 1975 o tráfego de carga por meio aéreo se tornou independente e com perspectiva de lucratividade (Chen e Chou, 2006). Sendo esse um ponto fundamental para o aumento acelerado na movimentação de carga nos últimos anos

O crescimento na movimentação deu visibilidade para a receita tarifária gerada através deste processo nos Terminal Logístico de Cargas (TECA), como é o cado do Aeroporto de Guarulhos, maior complexo logístico aeroportuário do Brasil. O terminal faz conexão com 34 países, todas as capitais brasileiras e as principais cidades do país por meio de mais de 720 voos diários operados por 40 empresas aéreas nacionais e internacionais (GRU Cargo, 2023).

O crescimento supracitado teve como forte vertente o comercio eletrônico, que segundo Van Asch et al. (2020) é visto como um mercado em expansão, e essa é uma das razões para as transportadoras europeias realizarem ações estratégicas para atrair mais mercadorias de e-commerce

No entanto, o crecimento na movimentação de carga implica em necessidades de melhorias na infraestrutura dos aeroportos, de forma a evitar gargalos operacionais nos terminais de carga. Isso posto, com o intuito de acelerar os investimentos o Governo Federal deu início às concessões aeroportuárias no Brasil em 2011, e até o final do ano de 2021, seis rodadas de concessão aconteceram no país, totalizando 44 aeroportos concedidos à iniciativa privada (ANAC, 2022). Em contrapartida a essa aceleração de mudança de administração, que objetiva a melhoria das eficiências dos terminais, o estudo de Kim et al. (2014) relata que o aumento na eficiência de um aeroporto não é garantido por meio da privatização do sistema de transporte.

Existem na literatura inúmeros estudos que avaliam as concessões aeroportuárias, e que mostram quais melhorias foram implantadas pela mudança na administração (Lin; Hong, 2006; Tsui et al., 2014; Wanke; Barros, 2017; Wang; Song, 2020). Entretanto, poucos estudam os efeitos das concessões na eficiência e movimentação de cargas em aeroportos brasileiros (Toledo et al., 2021).

O crescimento na movimentação de cargas mencionado anteriormente e a importância desse setor nas receitas aeroportuárias possibilitaram um avanço no número de estudos voltados a logística de e-commerce, que por sua vez tem sido explorada com ênfase no ponto de vista operacional (Van Asch et al., 2020). Entretanto, não existem na literatura estudos que avaliem como o aumento na movimentação de carga está associado ao crescimento do *e-commerce* no Brasil, e quais são os impactos que essa modalidade de comércio causa na eficiência dos terminais aeroportuários.

Assim, avaliar o impacto das concessões na eficiência, e verificar o contexto do *e-commerce* na eficiência operacional dos 44 aeroportos já concessidos no país é o objetivo do presente estudo, onde será medida a eficiência dos aeroportos concedidos, por meio da técnica Análise Envoltória de Dados (DEA), uma vez que se pretende comparar os resultados de um grupo de unidade de tomadores de decisão (DMU).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3. 1 Concessões Aeroportuárias

As concessões aeroportuárias ganharam intensidade no mundo em 1987, com pioneirismo no Reino Unido (Pereira e Rocha, 2019). Entretanto, somente após 2012 os aeroportos passaram a ser administrados por iniciativas privadas, com a premissa de associar o crescimento econômico do país com aumento na movimentação de passageiros no modal aéreo, supondo que as concessões sejam um fator importante para a competitividade e o aumento do nível de satisfação dos usuários (Bendinelli; Oliveira, 2015).

O programa de reestruturação do setor aéreo foi desenvolvido pelo Governo Federal, com o objetivo de impulsionar os investimentos nos sítios aeroportuários e proporcionar

melhorias nas qualidades de serviço prestado, entretanto, preservando a participação do Estado na coordenação das operações (Yosimoto et al., 2016). Ao todo 44 aeroportos foram concedidos no país até 2021, ao longo de todas as regiões brasileiras.

Dessa forma, com a evolução das concessões, a análise de eficiência passou a ser mais relevante na literatura, uma vez que permite esclarecer os pontos positivos da infraestrutura, operação e gestão aeroportuária. Por essa razão, estudos voltados a essa análise apresentaram um crescimento significativo, de forma a se verificar as eficiências dos terminais e os objetivos e metas que possibilitem seu crescimento (Tsui et al.,2014; Toledo et al., 2021).

3. 2 Movimentação de Carga Aérea no Brasil

Visando a otimização das receitas e visto o crescimento acelerado na movimentação de carga, as aeronaves de passageiros estão cada vez mais sendo projetadas com objetivo de transportar quantidade significativas de mercadorias em porão (belly cargo), objetivando um aumento na capacidade de movimentação de mercadorias em uma base de custo marginal (Boonekamp *et al*., 2017).

Entretanto, mesmo com o crescimento na movimentação de carga aérea nas últimas décadas, o valor total movimentado por meio desse modal corresponde a apenas 0,5% de toda carga transportada globalmente em termos de volume (Van Asch *et al.*, 2020). Em contrapartida à pequena movimentação em tonelagem, o transporte aéreo corresponde a cerca de 35% do valor de toda mercadoria transportada (Van Asch *et al.*, 2020), mostrando assim o mercado promissor. Entretando, segundo Dias e Lopes (2020) no Brasil a parcela de mercado de carga aérea se aproxima de 0,4% do total transportado de carga no país, implicando em um cenário ainda pior do que o mundial .

No contexto nacional, a movimentação de carga aérea vem crescendo em ritmo acelerado. O transporte de mercadoria pelo modal aéreo cresceu 29% em volume entre os anos de 2012 e 2021, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentada abaixo (ComexStat, 2023).

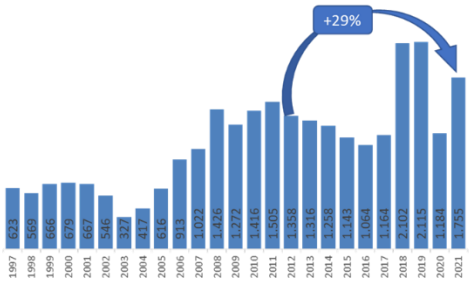


Figura 1 - Movimentação de Carga no Brasil. Source: ComexStat

Um fator crucial para o crescimento dessa movimentação foi o *e-commerce*, sendo os aparelhos eletrônicos, moda e roupas, beleza e cuidados pessoais os principais produtos dessa modalidade. O crescimento do setor por sua vez pode ser associado a diversos fatores. Na China, o mercado *Business to Consumer* (B2C) foi impulsionado em especial pelo aumento da renda per capita no país, além da escassez do mercado de eletrônicos em varejos de *shopping*, o que intensifica a compra de mercadorias por meio da internet. Nos Estados Unidos da América esse mercado vem crescendo especialmente por conta da empresa Amazon (Van Asch *et al.*, 2020).

3. 3 Análise Envoltória de Dados (DEA)

A análise envoltória de dados (DEA) é uma técnica não-paramétrica que emprega programação matemática para construir fronteiras de produção de unidades tomadoras de decisão (Decision Making Unit :DMUs). A técnica supracitada foi desenvolvida em 1978 por Charles, Rhodes e Cooper e utiliza abordagens de programação linear para medir as eficiências das unidades envolvidas no estudo. Lin e Hong (2006) afirmam que a DEA é fundamental para avaliar desempenhos de aeroportos, uma vez que se trata de uma análise de múltiplas unidades tomadoras de decisão, *inputs* e *outputs*, o que justifica a sua utilização no presente estudo.

A principal finalidade do uso da análise envoltória de dados é construir fronteiras de produção e indicar a eficiência produtiva das unidades tomadoras de decisão (Charnes, Rhodes e Cooper; 1978). Por meio da DEA é possível identificar uma fronteira de eficiência de um conjunto de unidades semelhantes e comparar os insumos utilizados e os resultados obtidos por

cada DMU da análise, sendo as unidades tomadoras de decisões mais próximas da fronteira de eficiência aquelas consideradas mais eficientes, enquanto as mais distantes são explicitadas por sua ineficiência (Lin e Hong, 2006).

Para Lin *et al* (2006), a unidade tomadora de decisão estará posicionada na fronteira de eficiência quando melhor for a combinação dos insumos e produtos que lhe é associada. Para que seja comparada a eficiência, é analisado cada peso das DMU's com a curva de eficiência traçada através da razão dos *outputs* e *inputs* (Ngo; Tsui, 2020). Por isso, os *outputs* devem ser maximizados e os *inputs* minimizados, de forma a se obter um maior valor de eficiência para as unidades tomadoras de decisão.

Os modelos mais conhecidos por sua vez são o DEA-CCR/CRS (*Constant Return to Scale*), desenvolvido por Charles, Rhodes e Cooper em 1978, define que os retornos de escala são constantes, e o modelo DEA-BCC/VRS (*Variable Returns to Scale*), criado por Banker, Charnes e Rhodes em 1984, trazendo agora a ideia de retornos variáveis (Negri e Borelli, 2019), conforme Figura 2.

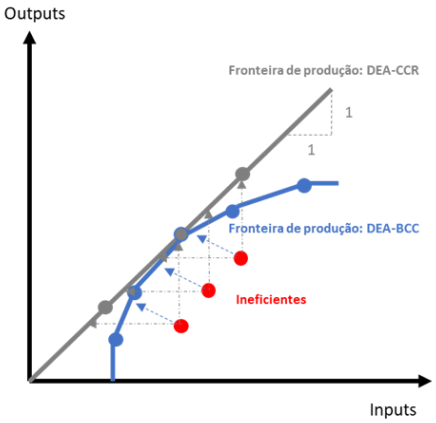


Figura 2 - Modelos DEA

Para analisar a eficiência operacional aeroportuária, deve-se considerar fatores de *inputs* e *outputs* relacionados a serviços aeronáuticos e comerciais (Wang *et al*., 2020).

4. METODOLOGIA

A princípio foram utilizados todos os aeroportos já concedidos no país, até o ano de 2021, totalizando 44 aeroportos, sendo esse espaço amostral reduzido à 25 aeroportos totais que possuem TECA. A metodologia DEA fornece os pesos da eficiência operacional dos terminais e aponta dentre os estudados aqueles que se mostraram eficientes e ineficientes.

De posse dos dados de eficiência calculados, serão feitas análises dos impactos das concessões em dois cenários, sendo o primeiro considerando como *output* toda movimentação de carga dos aeroportos e o segundo considerando somente o segmento do *e-commerce*. Por fim, através de uma série temporal será determinada a relação existente entre cada um dos cenários, objetivando definir se a eficiência é impactada na mesma proporção para ambos os cenários de análise.

Para a elaboração da primeira etapa da pesquisa, utiliza-se o método da Análise Envoltória de Dados (DEA) - *Window Analysis* para os 25 dentre os 44 aeroportos concedidos que possuem TECA.

A base de dados utilizada para aplicação do modelo DEA é fornecida pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2023), pelo Laboratório de Transportes e Logística Campus Universitário (LabTrans, 2023) e pela Governo Federal, por meio das informações de comércio exterior do Brasil (ComexStat, 2023). Com base nas revisões de literatura mencionadas, e a avaliação da correlação entre as variáveis de entradas e saídas já estudadas, foram consideradas os seguintes *inputs* para o presente estudo:

- **Área do terminal de cargas (m²)**: área total do TECA, caso o aeroporto possua. Em caso da existência de mais de um terminal para um determinado aeroporto, o valor total é a soma de todos os TECAs existentes no sítio aeroportuário;
- **Comprimento total da pista de pouso e decolagem (PPD) (m)**: Em caso de aeroportos com mais de uma PPD, o comprimento total corresponde a soma do comprimento de todas as pistas existentes, caso possa existir operações simultâneas no terminal;
- **Área do pátio (m²):** a área total do pátio inclui o pátio do terminal de passageiros e o pátio do terminal de carga existente no sítio aeroportuário,

Para os outputs, são considerados os seguintes:

- **Movimentação de carga (kg):** carga aérea total e correio embarcado, desembarcado e em trânsito, de destinos nacionais e internacionais, regulares;
- **Movimentação de carga do segmento *e-commerce* (kg):** carga total de carga proveniente de comércio eletrônico importado e exportado em voos regulares.
- **Movimentos de aeronaves:** número total de chegadas e partidas de aeronaves, nacionais e internacionais, em voos regulares;

Para avaliação da eficiência aplicou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA) - Window Analysis entre os anos de 2010 e 2021, de forma a se obter o ranking de eficiência dos aeroportos analisados, nos dois cenários mencionados anteriormente.

O DEA- Window Analysis considera o fator tempo e permite comparar as eficiências entre as janelas definidas, com tratamento diferenciado para cada intervalo temporal. Camioto et al. (2016) afirmaram que o DEA em janela segrega os anos analisados em diferentes grupos, através do intervalo de tempo do estudo, de forma a ser determinado o número de períodos (k), tamanho de cada uma das janelas (p), e o número de janelas (q). As informações mencionadas são determinadas através das equações 1, 2 e 3 a seguir.

$$k = Ano\ Final - Ano\ Inicial \quad (1)$$

$$p = \frac{(k+1)}{2} \quad (2)$$

$$q = k - p + 1 \quad (3)$$

Os dados por sua vez foram processados por meio do MaxDEA (2022).

Determinada à eficiência em cada uma das janelas, através do DEA, será calculada a média da eficiência das janelas de cada um dos dois cenários estudados, para entender se o comportamento da alteração na eficiência entre o cenário que considera toda movimentação de carga e o cenário considerando somente *e-commerce* apresentam alguma correlação,

5. RESULTADO

Aplicou-se o modelo DEA-BCC em janela orientado a *output,* e foi realizada a análise de eficiência dos anos de 2010 até 2021 nos 25 dos 44 aeroportos concedidos até o ano de 2021 que apresentavam TECA. As variáveis utilizadas para medição da eficiência foram área do terminal de cargas, área do pátio de aeronaves, comprimento de pista, número de movimentação de aeronaves e a movimentação de carga total no aeroporto no cenário 1, e a movimentação da carga somente associada ao comércio eletrônico, para o cenário 2. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresenta a classificação dos aeroportos analisados.

Tabela 1 - Eficiência no Cenário 1

ICAO	Janela 1 (2010 - 2016)	Janela 2 (2011 - 2017)	Janela 3 (2012 - 2018)	Janela 4 (2013 - 2019)	Janela 5 (2014 - 2020)	Janela 6 (2015 - 2021)	Média
SBGR	95%	97%	96%	97%	92%	91%	95%
SBPA	96%	96%	96%	97%	90%	84%	93%
SBTE	90%	92%	94%	93%	90%	86%	91%
SBVT	90%	93%	91%	95%	89%	84%	90%
SBJV	93%	95%	94%	93%	86%	78%	90%
SBCF	92%	93%	92%	93%	85%	80%	89%
SBBR	96%	94%	93%	91%	83%	76%	89%
SBKP	91%	87%	86%	84%	95%	86%	88%
SBFZ	90%	87%	88%	89%	85%	77%	86%
SBRF	84%	85%	86%	88%	86%	87%	86%
SBNF	78%	81%	84%	90%	86%	84%	84%

SBCT	89%	86%	85%	86%	78%	73%	83%
SBEG	88%	85%	83%	81%	80%	63%	80%
SBGO	90%	87%	82%	80%	71%	65%	79%
SBSV	88%	84%	80%	79%	71%	65%	78%
SBCY	78%	78%	78%	79%	73%	70%	76%
SBFL	73%	74%	73%	72%	63%	56%	69%
SBGL	68%	68%	66%	62%	55%	48%	61%
SBJP	46%	49%	54%	56%	55%	53%	52%
SBFI	31%	33%	33%	37%	35%	32%	33%
SBSL	38%	37%	35%	33%	29%	26%	33%
SBLO	31%	30%	29%	29%	26%	24%	28%
SBPL	27%	29%	29%	28%	25%	23%	27%
SBSG	12%	15%	19%	24%	26%	26%	20%
SBBV	33%	24%	12%	12%	12%	12%	17%

O Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos – SBGR apresentou melhor eficiência dentre os analisados, com média de 95%. Pode-se observar que as janelas que contemplam os anos de 2020 e 2021 apresentam uma redução na eficiência, o que indica um impacto do covid-19.

Tabela 2 - Eficiência no Cenário 2

ICAO	Janela 1 (2010 - 2016)	Janela 2 (2011 - 2017)	Janela 3 (2012 - 2018)	Janela 4 (2013 - 2019)	Janela 5 (2014 - 2020)	Janela 6 (2015 - 2021)	Média
SBGR	94%	95%	95%	96%	89%	87%	93%
SBPA	93%	92%	93%	94%	89%	83%	91%
SBCF	89%	91%	90%	93%	84%	79%	88%
SBVT	89%	89%	87%	92%	85%	83%	88%
SBBR	96%	94%	91%	89%	80%	73%	87%
SBNF	78%	81%	84%	90%	85%	83%	84%
SBTE	88%	92%	89%	86%	76%	69%	83%
SBCT	89%	86%	85%	86%	78%	73%	83%
SBJV	86%	86%	82%	87%	80%	72%	82%
SBFL	91%	87%	85%	80%	72%	70%	81%
SBGO	88%	86%	82%	80%	72%	67%	79%
SBSV	88%	84%	80%	79%	71%	70%	79%
SBCY	84%	83%	81%	80%	72%	67%	78%
SBRF	72%	72%	72%	77%	71%	74%	73%
SBKP	74%	75%	75%	74%	71%	69%	73%
SBGL	68%	68%	66%	62%	55%	48%	61%
SBFZ	58%	57%	56%	59%	54%	52%	56%
SBJP	44%	46%	47%	48%	46%	45%	46%

SBFI	31%	33%	33%	37%	35%	32%	33%
SBEG	35%	33%	30%	31%	30%	30%	31%
SBSL	31%	32%	31%	31%	27%	25%	30%
SBLO	31%	30%	29%	29%	26%	24%	28%
SBSG	9%	12%	15%	19%	20%	20%	16%
SBBV	34%	21%	8%	8%	8%	8%	14%
SBPL	12%	12%	11%	12%	10%	10%	11%

SBGR também constatou melhor eficiência quando considerado apenas a movimentação de *e-commerce* (Conforme Tabela 2), entretanto, com uma média um pouco inferior quando comparado com a movimentação de carga total. A redução da eficiência nas duas últimas janelas analisadas também se repete para o cenário 2, impacto do covid-19 no país, que implicou na redução dos *outputs* no período da pandemia.

SBGR, primeiro Aeroporto a ser concedido no Brasil, encontra-se entre os 3 piores, com uma eficiência média de 20% no cenário 1 e 16% no cenário 2. Esse resultado pode ser justificado pois o aumento realizado na capacidade de pista não resultou no crescimento dos *outputs*.

SBGL, que foi o quinto aeroporto concedido no país, também apresentou desempenhos de eficiência baixos. O que indica que mesmo com as melhorias em infraestrutura o terminal apresentou movimentação de carga em linhas e não teve grande avanço no número de pousos e decolagens.

No que diz respeito a movimentação de carga total, cenário 1, observa-se que dentre os 10 aeroportos com piores eficiência relatadas, 7 deles foram concedidos após a 5ª rodada de concessão realizada em 2019, uma vez que esses terminais concedidos nas últimas rodadas ainda não apresentaram até 2021 obras de melhorias de infraestrutura, o que impactou nas eficiências desses terminais foram apenas o número de movimentação e movimentação de carga. Para o cenário 2, que considera apenas a movimentação de e-commerce, também são sete os aeroportos concedidos após 2019 entre os 10 piores em eficiência.

Dentre os aeroportos concedidos em bloco, dos concedidos no Bloco Nordeste, na 5ª rodada de concessão, somente o aeroporto de Recife e João Pessoa apresentaram terminal de carga aérea, onde o SBRF apresentou eficiência de 86% no cenário 1, e 73% no cenário 2. SBJP, por sua vez, apresentou eficiência de 52% e 46% nos cenários 1 e 2 respectivamente. A boa eficiência de SBRF pode ser justificada pelo aeroporto se encontrar em uma região onde está situado um dos principais portos do país, o Porto de Suape, possibilitando um crescimento na movimentação de carga, um dos *outputs* do modelo.

No Bloco Sudeste, também da quinta rodada de concessão, apenas o Aeroporto de Vitória apresenta terminal de cargas, com eficiência média de 90% no cenário 1 e 88% no cenário 2. O Bloco Centro-Oeste, também concedido na 5ª rodada,o Aeroporto Internacional de Cuiabá, único com terminal de cargas, apresentou eficiência de 76% para o cenário 1, e 78% para o cenário 2.

No tocante aos aeroportos do Bloco Sul, o Aeroporto de Joinville apresentou melhor eficiência no cenário 1, com 90% de eficiência média, e o Aeroporto Internacional de Curitiba foi o com melhor performance no que diz respeito a movimentação de *e-commerce*, com 83%.

Dos 4 aeroportos do Bloco Central que contém TECA, o Aeroporto de Teresina apresentou melhor eficiência tanto no cenário 1 como no cenário 2. No Bloco Norte, que conta com o Aeroporto Internacional de Manaus e Aeroporto Internacional de Boa Vista com terminal de carga aérea, SBEG apresentou melhor desempenho, com eficiência de 80% no cenário 1, e 31% no cenário 2. A Figura 3

apresenta a comparação da eficiência para cada um dos cenários em análise.

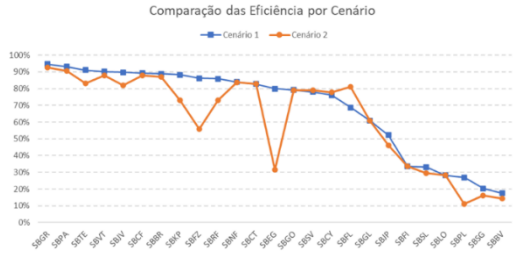


Figura 3 - Comparação da Eficiência

Para maior parte dos aeroportos concedidos, observa-se um comportamento semelhante entre o cenário 1 e o cenário 2 de análise, conforme demonstrado na Figura 7 acima, exceto os aeroportos SBBR, SBKP, SBFZ e SBEG.

No que diz respeito ao comportamento da eficiência antes e depois da concessão aeroportuária, grande parte dos aeroportos em análise apresentaram a pandemia da covid como marco inicial da administração privada, não se tendo parâmetros de avaliação da melhoria de eficiência pós concessão que não esteja associado a um período pandêmico, conforme Tabela 3 que apresenta os valores de eficiência para o cenário 1.

Tabela 3 - Comparação Eficiência - Antes e Depois da Concessão

ICAO	Antes da Concessão	Após a Concessão e Antes da Pandemia	Após a Concessão e Durante Pandemia (2020-2021)
SBGR	91%	97%	76%
SBPA	96%	94%	53%
SBTE	92%	-	71%
SBVT	94%	-	38%
SBJV	91%	-	40%
SBCF	95%	92%	47%
SBBR	97%	92%	41%
SBKP	99%	87%	91%
SBFZ	89%	85%	66%
SBRF	86%	97%	78%
SBNF	86%	-	59%
SBCT	86%	-	35%
SBEG	81%	-	72%
SBGO	82%	-	38%
SBSV	87%	68%	40%
SBCY	79%	76%	47%
SBFL	68%	56%	18%
SBGL	72%	63%	18%
SBJP	53%	64%	36%
SBFI	35%	-	15%
SBSL	34%	-	16%
SBLO	30%	-	12%
SBPL	28%	-	7%
SBSG	12%	24%	17%

SBBV	18%	-	12%

Dessa forma, observa-se que apenas SBGR, SBRF e SBJP, dos 13 aeroportos que foram concedidos à iniciativa privada antes da pandemia do covid-19 apresentaram melhora na eficiência operacional após a passagem do aeroporto para a administração privada.

Se observado o período de concessão onde a pandemia do novo coronavírus já tinha sido decretado (2020 e 2021), os três melhores aeroportos foram respectivamente SBKP, SBRF, e SBGR, com respectivamente 91%, 78% e 76%, todos aeroportos localizados em capitais, e *hub* de companhias aéreas renomadas no país, o que justifica a maior disparidade entre eficiências desses terminais e dos demais aeroportos, podendo ser resultado da maior capilaridade de rotas advindas das companhias aéreas que operam nos aeroportos *hubs*.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto das concessões aeroportuárias na eficiência operacional dos 44 aeroportos já concedidos no Brasil, bem como investigar o contexto do comércio eletrônico nessa eficiência. Será utilizada a técnica de Análise Envoltória de Dados (DEA) para medir a eficiência dos aeroportos e comparar os resultados entre diferentes unidades de tomada de decisão. Essa pesquisa é importante devido ao crescimento acelerado na movimentação de carga e à necessidade de melhorias na infraestrutura dos terminais para evitar gargalos operacionais. Além disso, há poucos estudos na literatura que abordam os efeitos das concessões aeroportuárias na eficiência e movimentação de cargas no contexto brasileiro, assim como a relação entre o aumento do comércio eletrônico e a eficiência dos terminais aeroportuários.

Foi utilizado o modelo DEA-BCC em uma abordagem de janela orientada para a saída a fim de analisar a eficiência de 25 dos 44 aeroportos concedidos até 2021, que possuíam Terminal Logístico de Cargas (TECA), ao longo dos anos. Como inputs do modelo foram utilizados a área dos terminais de carga, comprimento de pista de pouso e decolagem e área de pátio. Os outputs utilizados foram a movimentação de carga, movimentação do segmento e-commerce e movimentação total de aeronaves, em dois cenários de análises.

Os resultados do estudo expõem um comportamento semelhante na eficiência operacional nos dois cenários supracitados, E que SBGR apresentou a melhor eficiência media nas duas análises.

No tocante à melhoria de eficiência dos aeroportos concedidos antes da pandemia do covid-19, somente 3 dos aeroportos analisados (SBGR, SBRF e SBJP) apresentaram melhora na eficiência, e se observado o período pós covid os 3 aeroportos com melhores eficiências foram SBKP, SBRF e SBGR, que são aeroportos localizados em capitais e que servem como hubs para companhias aéreas renomadas no país apresentam uma maior disparidade de eficiência em comparação aos demais terminais. Isso pode ser atribuído à maior conectividade de rotas oferecidas pelas companhias aéreas que operam nesses aeroportos hubs.

7. REFERENCES

ANAC, 2022. Agência Nacional de Aviação Civil – Aeroporto Concedidos. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/concessoes/aeroportos-concedidos.

Bendinelli, W. E. & Oliveira A. V. M., 2015 Modelagem econométrica da demanda em aeroportos privatizados: estudo de caso do Aeroporto Internacional de Confins, Belo Horizonte. The Journal of Transport Literature, p. 20 -24, http://dx.doi.org/10.1590/2238-1031.jtl.v9n2a4

Boonekamp, T., & Burghouwt, G., 2017. Measuring connectivity in the air freight industry. Journal of Air Transport Management, 61, 81–94.

https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.05.003.

Camioto, F. C., 2013. Consumo energético nos setores industriais brasileiros – Uma avaliação de desempenho e estratégias para redução da emissão de CO2. Tese (Doutorado). Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Univer-sidade de São Paulo, São Carlos.

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. https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8.

Chen, C.& Chou, S., 2006. A BSC Framework for Air Cargo Terminal Design: Procedure and Case Study. Journal of Industrial Technology, v.22, n 1.

ComexStat, 2022. Estatística do comércio exterior. Disponível em: http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral.

Dias M. O., Lopes R. O. A, 2020. Air Cargo Transportation in Brazil. Global Scientific Journals, v.8, 2320-9186.

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.

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. http://dx.doi.org/10.2753/PMR1530-9576380103.

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, 100412. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2019.100412.

Pereira, E. S. & C. H. Rocha, 2019. Concessões Aeroportuárias Brasileiras, Saúde Financeira e Prática Regulatória: Uma Aplicação do Modelo de Fleuriet. Revista Estudos e Pesquisas em Administração - Repad, v. 3, n. 3, p. 147-161, 2019. DOI: 10.30781/repad.v3i3.9011

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.

Tozi, L. A., Correia, A. R., Müller, C., Mendes, D. dos S., & Feng, L. C., 2010. Análise da importância relativa de atributos de nível de serviço em um terminal de cargas aeroportuário. TRANSPORTES, 18(2). https://doi.org/10.14295/transportes.v18i2.421

Toledo, F.S., Falcão, V.A., Camioto, F.A., Silva, P.A.L., 2021. Does Privatization Make Brazilian Airports More Efficient? Transportes, v. 29, n. 2. 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. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.05.003.

Van Asch,. T. V., Dewulf, W. ,Kufper F., Cárdenas, I. & Van de Voorde, E., 2020. Cross-border e-commerce logistics – Strategic success factors for airports. Research in Transportation Economics, v.79, 100761. https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100761.

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, 101925. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101925.

Wanke, P., Barros, C.P., 2017. Efficiency thresholds and cost structure in Senegal airports. Journal of Air Transport Management, v. 58, pp. 100–112. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.10.005.

EVALUATING UNSTABLE APPROACH SCENARIOS WITH A SPECIFIC ENERGY METHOD APPLIED TO A BRAZILIAN AIRPORT

Leonardo Matoso de Abreu, José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani and Donizetti de Andrade
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

*** Corresponding author's e-mail address**: leonardomatoso@gmail.com

PAPER ID: SIT 2212

ABSTRACT

The International Air Transport Association (IATA) released the 2022 Global Aviation Flight Safety Report, revealing a reduction in the number of fatal accidents, compared to the 2021 figures and the average of the last five years prior. The Boeing Company has been gathering and studying accident data involving commercial aircraft since 1959. The last Boeing report published on the subject in August 2022 points out that the highest percentage of fatal accidents occurred in the final approach and landing phases. One of the causes of an unstable approach is the pilot's inability to manage the aircraft's total energy (translational kinetic and gravitational potential) during the approach phase since there is no directly related indication in the cockpit. Be that as may, both low and high-energy scenarios can lead to a non-stabilized approach during the final segment, thus representing the most common contributing factor that leads to a loss of control in flight, controlled flight into terrain, and runway excursion. Traditionally, flight safety management systems use Flight Data Monitoring (FDM) applications to assess the risk level of flight operations, based on the volume of exceedances occurring in the various flight phases. In the present work, three Boeing 737-400 approaches at Eduardo Gomes International Airport (SBEG) in Manaus, Brazil, have been analyzed taking advantage of all flight data collected from an FDM system to identify and understand possible atypical data, as well as potential precursors of unstable approaches from the initial approach phase on that can lead to accidents or incidents. A total specific energy condition monitoring method has been applied to such data to determine specific low- and high-energy scenarios applicable to such locations. The results are conveyed and combined into pilot training recommendations to mitigate unstable approach risks and in the final instance, to avoid accidents.

Keywords: Unstable Approaches; Flight Data Monitoring; Total Aircraft Energy.

1. INTRODUCTION

According to recent studies (Flight Safety Foundation, 2000), 66% of 76 accidents that happened around the world between 1984 and 1997, during the approach and landing phases, had an unstabilized approach as a contributing factor. In a simplistic definition, approaches are considered stabilized when the aircraft is flying with the correct airspeed, at the correct altitude, with the correct thrust setting and configuration, in the final approach path (vertical and lateral) at a certain distance from the touchdown point. Any deviation from this condition along the trajectory, outside certain limits, is considered unstabilized.

Flight Safety Foundation concluded that one of the primary causes of unstable approaches is the pilot's inability to manage the aircraft's energy condition during the approach-and-landing phase of flight Statistics show that in 36 percent of the accidents/incidents involving incorrect management of aircraft energy conditions, the aircraft were low/slow, and 30 percent were high/fast (Flight Safety Foundation, 2000). Also, IATA indicates that 61% of all aeronautical accidents from 2012 to 2016 occurred during the phases of approach and landing and 16% of these accidents had as a contributing factor unstabilized approaches. (International Air Transport Association, 2017)

The aircraft's energy state is related to airspeed (or tendency to increase or decrease speed), altitude (or vertical speed, or glide path angle), drag (caused by speed brakes, slats/flaps, and landing gear), and thrust. To maintain and monitor the appropriate energy condition, pilots - as one of their primary tasks - must use all available references, such as autopilot modes, flight director modes, aircraft instruments, warnings, and protections. Nevertheless, as aircraft energy condition is the outcome of airspeed, altitude, drag, and thrust combination, it is not a pilot direct reading, and it possibly leads to a pilot misperception of a potentially unstable approach.

As a standard practice, air carriers use exceedance analysis to identify the events and factors involving unstable approaches to improve flight safety. The International Civil Aviation Organization (ICAO) establishes that all airlines are required to implement Flight Data Monitoring (FDM) programs, also known as Flight Operational Quality Assurance (FOQA), for the early identification of adverse safety trends and the key element is the application of corrective action and follow-up to assure that unsafe conditions are effectively remediated (International Civil Aviation Organization, 2022). Flight data analysis carried out with modern FDM software has contributed immensely to the identification of contributing factors of accidents and incidents in commercial aviation, and in increasing the safety of flights through mitigating actions, thus improving the programs of pilot training and operating procedures. However, the focus of analysis still consists of identifying and quantifying the events where exceedances occurred. The FOQA program establishes "gates" along the trajectory of approach, where flight parameters and aircraft configuration need to be within certain limits. If the aircraft exceeds any of these limits, an exceedance will be recorded. Under this context, unstabilized approaches are generally detected by complex logic using key flight parameters such as altitude, airspeed, and acceleration. In this detection process, however, energy-based logic is generally not considered.

The implementation of a total aircraft energy-based logic could represent a simpler important method to identify unstable approaches and their probable causes. The determination of the aircraft's total, kinetic, and potential energy (via flight parameters) may be useful to understand what can be done to help pilots become aware of the aircraft energy condition and therefore avoid unforeseen unstable conditions during the final approach which otherwise can lead to an incident or even worse, an accident with fatalities.

This research proposes a specific method applied to several flight data collected from an airline FDM program database to quantify the aircraft's energy state within minimum and maximum energy boundaries and establish a relationship with precursor anomalous data and their influence on unstable approaches. As proof of concept, three Boeing 737-400 approaches at Eduardo Gomes International Airport (SBEG) in Manaus, Brazil, have been analyzed.

BACKGROUND

The Federal Aviation Administration mentions various aspects linked to the Flight Operational Quality Assurance (FOQA) program: namely its implementation, people involved, technology selection, data collection, transmission modes, etc. When it comes to Data Analysis, two main analysis techniques are identified: exceedance analysis and statistical analysis. In the analysis of exceedances, carriers are supposed to identify a list of parameters that must never exceed a certain limit during operations. These parameters are normally derived from the company's operational standards and are related to aspects such as speed limits, pitch, and flap position, to mention some. The intention is to identify the occurrence of specific events such as late configuration for landing, high pitch during landing, low engine thrust, etc. In statistical analysis, the focus lies on detecting specific trends in flight operations that may raise safety concerns, identifying deficiencies in training programs or company policies, and providing an opportunity to review all the above-mentioned deficiencies. (Federal Aviation Administration, 2004).

Traditionally, flight safety management systems use FDM to assess the risk level of operations, based on the volume of exceedances that occur in the various flight phases. NASA developed through the Ames Research Center, a model called Aviation Performance Measuring System (APMS) that goes beyond detecting exceedances (NASA, 2004). This system intends to analyze all flight data, rather than wait for an aircraft to exceed a certain limit to assess whether it was an isolated event or a trend, but it intends to identify in all flight data, possible atypical data, potential precursors of destabilized approaches that can lead to accidents or incidents (Chidester, 2003).

Part of comprehending the causes of accidents involves clarifying and contextualizing specific details that may offer a better interpretation of the reasons why exceedances occurred (Dillman, 2015). As most accidents happen in the final approach phase and during landing, and most have as a contributing factor a destabilized approach, it is necessary to identify/analyze the contributing factors to destabilized approaches in earlier phases, or that is, in the initial and intermediate approach phases.

In several other studies, precursor causes were identified such as human factors, deficiencies of a technical nature, pilot training, communication, etc. However, there is a large amount of flight data that can be analyzed in the initial and intermediate approach phases, where often no exceedance occurs, but the standard operation does not align with the pattern identified on flights leading to a stabilized approach in the final phase.

Stabilized approaches, which normally do not attract attention since they do not have exceedance events, provide an amount of data capable of delineating operational patterns that can improve the procedures already established as safe. What is more, they may help to identify approaches that deviate from these patterns, even without exceeding pre-established parameters in the FDM or the operational standard procedures. Within the international research community, a movement has been observed in the sense of increasing flight safety by analyzing all flight data collected, and not only those that accused events where some limit has been exceeded. This new concept called by the FSF “Learning from all operations”, expands the horizons for improving flight safety. The Safety II concept also goes up a notch in the sense of working flight safety, understanding and taking advantage of all flight data that indicate a favorable outcome, as a basis for explaining those that occasionally have an adverse result.

In 1997, the National Transport Safety Board (NTSB) issued a safety recommendation that requires all 14 CFR Part 121 and 135 operators to review and revise their company operation manuals to delineate flight crew member (pilot flying/pilot not flying) duties and responsibilities more clearly for various phases of flight. In addition, operators were required to define terms more clearly, mainly those critical for the safety of flight decision-making, such as “stabilized approach.” (National Transport Safety Board, 1997).

In response, the FAA also issued stabilized approach recommendations (Federal Aviation

Administration, 2021). The fundamental premise of the stabilized approach concept was that a general description of the aircraft state in the final approach and landing phases of flight should be based on three main aspects: (a) aircraft position on the glide path and the lateral of the extended runway centerline, (b) energy state, and (c) landing configuration.

Stabilized Approaches

Considering a more precise definition (Flight Safety Foundation, 2000) an approach is stabilized only if all the criteria in company standard operating procedures (SOPs) are met before or when reaching the applicable minimum stabilization height. The recommended elements of a stabilized approach, to be checked at the minimum stabilization height, are as follows:

1. The aircraft is on the correct flight path.
2. Only small changes in heading/pitch are required to maintain the correct flight path.
3. The aircraft speed is not more than the threshold crossing reference speed (Vref) + 20 knots indicated airspeed and not less than the Vref.
4. The aircraft is in the correct landing configuration.
5. The sink rate is no greater than 1,000 feet per minute, a special briefing should be conducted.
6. The power setting is appropriate for the aircraft configuration and is not below the minimum power for approach as defined by the aircraft operating manual.
7. All briefings and checklists have been carried out.

The FSF also recommends that an approach that becomes unstabilized below 1,000 feet above airport elevation in IMC requires an immediate go-around (Flight Safety Foundation, 2009).

Approach Energy Management

FAA defines energy management as the process of planning, monitoring, and controlling altitude and airspeed targets related to the airplane's energy state to (1) attain and maintain desired vertical flightpath-airspeed profiles, (2) detect, correct, and prevent unintentional altitude-airspeed deviations from the desired energy state, and (3) prevent irreversible deceleration and/ or sink rate that results in a crash (Federal Aviation Administration, 2021)

The energy state of an aircraft is composed of gravitational potential and translational kinetic energy. During descent and landing, pilots must reduce the kinetic and potential energy to properly establish a landing configuration in such a way that thrust is at a minimum to reduce fuel consumption and to allow speed reduction to reach the landing speed (Vref) on the final approach. This is quite a challenging task for pilots considering that it is not always a continuous descent flight path. Air Traffic Control (ATC) plays an important role in this matter, imposing altitude restrictions, speed constraints, and radar vectoring, which can make it difficult for pilots to plan the descent. The vertical profile, in some situations, must be attained with the intervention of speed brakes, high-lift devices, and landing gear, for additional energy dissipation.

Aircraft deceleration during the approach phase, controlling and monitoring its energy, balancing airspeed, thrust (and drag), and flight path, to establish a landing configuration and complying with all the recommended stabilization criteria at 1,000 feet above airport elevation, which is the typical company policy, is the goal to achieve a safe landing.

Although deceleration characteristics largely depend on the aircraft type and gross mass, the FSF (Flight Safety Foundation, 2000) describes the typical values that can be considered for the pilot assessment and management of the aircraft deceleration capability as stated below:

- Deceleration in level flight:
  - With approach flaps extended: 10 to 15 knots per nm.
  - With landing gear down and flaps full: 20 to 30 knots per nm.

- Deceleration on a 3-degree glide path:
  - With landing flaps and gear down: 10 to 20 knots per nm.

According to the Boeing 737 Flight Crew Training Manual (The Boeing Company, 2010),

a typical 140-knot final approach ground speed, is to maintain a descent gradient of 300 feet per nm/700 feet per minute. Deceleration on a three-degree glide path in a clean configuration usually is not possible, and the use of speed brakes below 1,000 feet above airfield elevation and/or in the landing flaps configuration is not recommended. This means that, typically, on the final segment (Figure 1), the outer marker (OM) is located at 6.0 nm from the runway threshold and the stabilization point (1.000 ft) at 3.0 nm. Considering a conservative deceleration of 10 knots per nautical mile (aircraft in a full landing configuration), the maximum deceleration achievable is 30 knots between these two points. This means that the maximum speed of the aircraft, which it must attain at the OM is 170 kt and it needs to be stabilized at 1,000 feet above field elevation with the correct Vref (e.g., 140 knots).

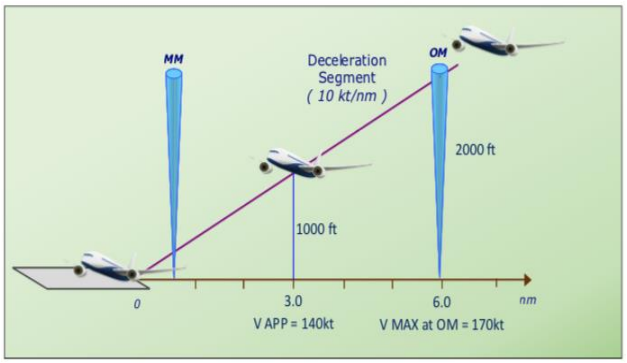


Fig. 1-Typical deceleration along Glide Slope

Effective energy management is essential to flight safety. It is of paramount importance for pilots to understand and manage the airplane's energy in terms of altitude and airspeed. When airborne, the airplane flight control receives pilot inputs to climb/descend or accelerate/decelerate, on a constant energy movement.

When the pilot adds thrust (T), the airplane gains energy and simultaneously loses energy through aerodynamic drag (D). The energy flows continuously into and out of the airplane while in flight. Usually measured as Specific Excess Power (Ps), or rate of energy change, the net energy flow is a direct function of the difference between thrust and drag, according to Equation 1:

$$Ps = \frac{T-D}{W}.V \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Where:
T = Thrust [N]
D = Drag [N]
V = True airspeed [m/s]
W = Aircraft mass [kg]

The airplane's total energy resulting from the net energy flow on one side, and the changes in the energy accumulated as altitude and airspeed on the other side, establish an important relationship that can be translated through the airplane's energy balance equation:

T - D = altitude change + airspeed change (Eq.2)

Furthermore, the appropriate use of the aircraft flight controls for normal energy management (control and monitoring), requires pilots' ability to identify, assess, and mitigate two major risks associated with the mismanagement of energy such as: (a) unwanted deviations from the desired energy state; and (b) unintentional, irreversible deceleration and/or sink rate causing depletion of mechanical energy. Both risks involve unintended altitude-airspeed deviations and unforeseen, continuous airspeed and/or altitude loss coupled with little or no available excess power in each flight condition. Proper energy management is therefore essential for performing any maneuver as well as for attaining and maintaining desired vertical flightpath and airspeed profiles in everyday flying (FAA, 2021).

METHODOLOGY

The present work has used flight data collected from three flights performed by B737-400 aircraft, starting at an in-track position corresponding to 5000 ft above the touchdown point, on approach for landing at Eduardo Gomes International Airport in Manaus, Brazil. The data were processed by a specific method that computes the potential and kinetic energy condition of the aircraft, from the selection of the first flap setting to its landing configuration in the final approach phase and the crossing of the runway threshold.

The geographic position of the aircraft, its altitude about the runway elevation, its speed

about the ground, and its reference speed for the Flap configuration at each point of the approach, constitute elements to determine its energy condition. Therefore, each flight presents a trajectory (vertical and horizontal) that can be analyzed based on the amount of energy. In addition, it is possible to verify the number of flights that presented high or low energy and how many of these flights under these conditions resulted in destabilized approaches below 1,000 feet above the runway elevation.

The present analysis selected three examples of aircraft energy conditions during the final approach: low energy, high energy, and "on path" energy. The curves of barometric altitude, calibrated airspeed, and energy condition were compared to understand the pilot's actions, dealing with pitch and thrust applied to the aircraft's controls. Except for the wind conditions, any other kind of weather conditions, in terms of visibility, cloud base, or thunderstorms, were not considered.

Specific Energy Tunnel

The total energy of an aircraft (*Et*) at any point of its trajectory in the approach segment, is computed by the summation of the potential and kinetic energy terms, which are computed according to Equation 3:

$$E_t = m.\frac{V^2}{2} + m.g.H \quad \text{[J] (Eq. 3)}$$

Where: V = Ground speed [m/s]
H = Relative height [m] of the center of mass of the vehicle concerning the touchdown point elevation.
m = vehicle total mass [kg]
g = standard gravitational acceleration constant (9.80665 m/s^2)

Due to the variation of fuel burn along the approach being small when compared with the total mass of the aircraft, the total mass (m) may be considered constant. Thus, the total energy (*Et)* may be divided by the total mass (*m*) without any major loss of accuracy. Therefore Eq.1 may be rewritten in terms of specific energy (e_t) according to Equation 4:

$$e_t = \frac{V^2}{2} + g.H \quad \text{[J/kg] (Eq.4)}$$

The idea is to compare at every point of the trajectory the total specific energy of the aircraft with a reference specific energy value associated to a stabilized approach path. For that purpose, a reference specific energy state is calculated at every point of the trajectory according to Equation 5:

$$e_{ref} = \frac{(\frac{VMS}{\sqrt{\sigma}} + HW)^2}{2} + g.Href \text{ [J/kg] (Eq.5)}$$

In Equation 5, VMS is the maneuver speed for the flaps position, as a function of the aircraft mass, defined according to Table 1:

Table 1: Boeing 737-400 Maneuver Speeds

Flaps Position [deg]	Aircraft mass of less than 53,070 kg	Aircraft mass from 53,070kg to 62,823kg	Aircraft mass above 62,823kg
Up	210 kt (108.03 m/s)	220 kt (113.17 m/s)	230 kt (118.32 m/s)
1	190 kt (97.74 m/s)	200 kt (102.88 m/s)	210 kt (108.03 m/s)
5	180 kt (92.6 m/s)	190 kt (97.74 m/s)	200 kt (102.88 m/s)
10	170 kt (87.45 m/s)	180 kt (92.6 m/s)	190 kt (97.74 m/s)
15	150 kt (77.16 m/s)	160 kt (82.31 m/s)	170 kt (87.45 m/s)
25	140 kt (72.02 m/s)	150 kt (77.16 m/s)	160 kt (82.31 m/s)
30 & 40	Vref for Flaps Setting +5 kt (2.57 m/s)		

In Table 1, the reference speed for Flaps 30 and 40 (Vref30 and Vref40) is the runway threshold reference crossing speed, where a 23% margin above the 1-g stall speed of that configuration is applied. It is defined according to the Equations 6 and 7 below:

- Vref30 = 0.6748m + 32.92 [m/s] (Eq.6)
- Vref40 = 0.7079m + 33.05 [m/s] (Eq.7)

Where: m is the aircraft mass [kg]

It is noteworthy that VMS is divided by the square root of the density ratio (σ) to convert its value into true airspeed in the formula. The density ratio is calculated directly from the static air temperature (SAT) available in the FDM data, according to Equation 8:

$$\sigma = ((SAT + 273.15)/288.15)^{4.25588} \quad \text{(Eq.8)}$$

where SAT is the static air temperature (ºC) measured at the point of interest in the trajectory.

The variable *DW* is the direct wind component (in m/s) computed from aircraft heading and wind vector available in the FDM data set, computed according to Equation 9. It assumes negative values when headwind, and negative values when tailwind.

$$HW = WSPD.\cos((HDG - WDIR).\frac{\pi}{180}) \quad \text{(Eq.9)}$$

Where:
WSPD = Wind speed [m/s]
WDIR = Wind Direction [º]
HDG = Aircraft Heading [º]

The reference height (*Href*) is the theoretical height above the touchdown point of the runway defined as a function of the glide path angle (γ in radian) and distance to touchdown (DTD) as shown in Equation 10 as follows:

$$Href = DTD\,.\tan(\gamma)\ [\text{m}] \quad \text{(Eq.10)}$$

The distance to touchdown (DTD) is computed related to the touchdown point (latitude and longitude) detected for each flight when the weight-on-wheels signal is set to "ON". This distance is calculated according to Equation 11 (The Boeing Company, 2012) :

DTD = 3437.7387(ACOS(SIN(LATref)*SIN(LAT) +COS(LATref)*COS(LAT)*COS(LAT-LAT_ref))* [m] (Eq.11)

where:
LATref = Touchdown point latitude [rad]
LAT = Actual latitude of the aircraft [rad]
LONref = Touchdown point longitude [rad]
LON = Actual longitude of the aircraft [rad]

Once the reference energy is computed for each point on the flight path, two boundaries are defined to determine if the aircraft is at low or high energy at that point. Therefore, a percentual margin is adopted to define the upper and lower limits from the reference energy density. Consequently, these limits are defined in Equations 12 and 13 below as follows:

$$e_{inf} = (1\text{-}Margin).e_{ref} \quad [\text{J/kg}] \quad \text{(Eq.12)}$$

$$e_{sup} = (1+Margin).e_{ref} \quad [\text{J/kg}] \quad \text{(Eq. 13)}$$

In this study, a margin of 0.2 (or 20%) is adopted for the determination of the lower and upper margins.

With e_t, e_{ref}, e_{inf} and e_{sup} defined, a specific energy tunnel may be plotted along the trajectory, from the initial approach to touchdown, to evaluate if an approach is stable, once it has been conducted within the energy density margins along its trajectory. Figure 2 shows an example of this concept, where the reference trajectory and upper/ lower limits are plotted. A test point for a flight evolving 3.5 nm from touchdown is inserted on the final approach. It is possible to see that at this point the aircraft is still dropping under the energy limits and therefore the approach should be considered stable at that position. Plotting the actual trajectory from the aircraft would provide the FDM analyst with a complete picture of the approach and the portion where it was not stabilized.

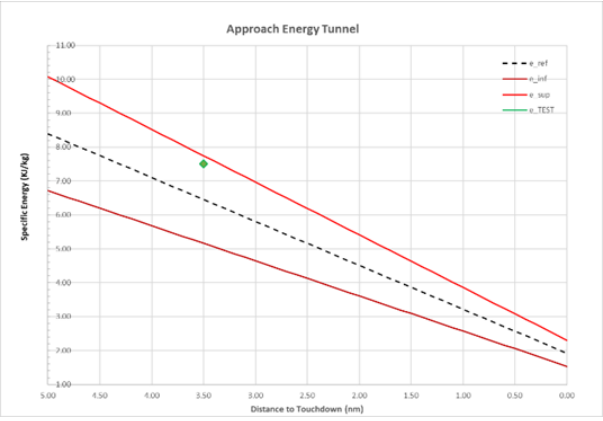


Figure 2: Energy Tunnel Example

RESULTS AND ANALYSIS

The three flights selected for the present analysis were carefully chosen to illustrate how the energy tunnel method can assist the FDM analyst in evaluating the root causes of unstabilized conditions in pair with the analysis of the conventional parameters. Examples of regular energy, high energy, and low energy have been analyzed below. The figures corresponding to each analysis (3a,3b,4a,4b,5a, and 5b) have been depicted in Appendix I.

Regular Energy Approach

Fig. 3a describes an aircraft tunnel of energy from right to left, to demonstrate an aircraft energy trajectory throughout its approach to land. The horizontal axis depicts a continuous progression in distance (nautical miles), while the vertical axis reports values of specific energy (kJ/kg) across that progression.

The ideal energy state for a stabilized approach is also observed in Fig. 2 as a dashed black line, in this present work called a reference line, the middle line between the high energy boundary is depicted as a red line and the low energy boundary as a yellow line. The blue line describes the aircraft's energy trajectory, which is in this case beyond the 10 nm mark, almost coincident with the reference line, meaning that the aircraft's energy during approach was well managed.

In Fig. 3b the analysis establishes a comparison between the aircraft's Calibrated Airspeed (CAS) and Altitude (Barometric in feet). To better understand its influence over the aircraft energy trajectory, the tailwind along the approach was added, as well as the aircraft configuration changes and the CAS at each point.

The tailwind depicted in Fig. 3b demonstrates an impact on the aircraft's energy state. From 18 nm until 10 nm to the runway threshold, the tailwind decreases from 20 kt to 7 kt. The blue line on that segment is above the reference line but below the high energy limit, which keeps the aircraft inside the tunnel of energy. At 13.8 nm, the high and low energy boundary lines, and the reference line, parallelly presented a considerable change, meaning that flap 1 was selected. At 10.6 nm flaps 5 was selected, clearly identified by another parallel change over the three lines. At 7.7 nm, the landing gear was lowered and flap 15 was selected. At 6.6 nm, landing flaps were selected, and the aircraft was brought to the approach speed (Vapp). At 6 nm, to the runway threshold, the aircraft energy state was stable over the reference line. The aircraft crossed the stabilization point (1.000 ft AGL) at 3 nm and stabilized on the final approach. A slight high energy condition is observed during the flare.

Low Energy Approach

The line chart in Fig. 4a depicts another aircraft approach with a similar tailwind as in the previous example of a normal energy graph. In this case, the aircraft described a lower vertical profile. Its configuration for landing was established earlier than a typical approach profile for the same airport. That condition explains why the aircraft's energy was close to the low energy boundary and eventually below it, on the segment between the 18 nm mark and 6 nm to the runway threshold. Once the aircraft captured the glide path, the Flaps 40 was selected for landing and the speed was reduced for the approach speed, which is the Vref + 5kt (minimum). A significant drop in speed happened at 3.5 nm to the threshold. As a result, the aircraft's energy values also dropped with a clear variation on the blue line at that point, as depicted in Fig. 3.

The segment flown before the stabilization gate, where the aircraft was below the minimum energy state was not detected by the FDM (Fig. 4). An event of Low Speed was detected at 3.5 nm to the threshold, still above the stabilization gate when a sudden drop in speed led the aircraft to a speed as low as 127 kt (Fig. 4b), which was 5 kt below Vref (minimum speed). Such a condition could have brought the aircraft to a LOC-I situation. The aircraft passed the stabilization gate at an acceptable speed of 5 kt above Vapp, despite speed variation below 1000 ft and the wind direction variation on the last 3 nm, from a 2 kt headwind to a 6 kt tailwind at the threshold, suggesting a turbulent approach. In this case, the energy tunnel method provides the FDM analyst with the whole picture of the approach phase of flight. The traditional FDM

analysis methods have their focus on exceedances below the stabilization gate only, regarding the standard stabilization criteria, therefore, the analysis considering the aircraft energy state associated with the traditional analysis can be an important tool for FOQA analysts to improve the evaluation**.**

High Energy Approach

The flight analysis depicted in Fig. 5a describes a high-energy trajectory example on the final approach segment. During the initial approach phase, the aircraft was in a low energy state at 25 nm to the runway with a tailwind of 35 kt maintaining an altitude of 4.000 ft.

At the mark of 18 nm, the pilot started a continuous descent until 8 nm to the threshold and leveled off at 2000ft with a CAS of 193 kt. At 5.5 nm the aircraft captured the glidepath with the energy curve reaching the high energy boundary. The landing flap setting of 30 was selected at a speed of 169 kt. The minimum speed reached during the final approach was 139 kt, which was 10 kt above the Vapp of 129 kt. The pilot added power and the speed increased, passing the stabilization gate 19kt above Vapp. The speed was kept high until crossing the threshold at 150 kt, which was 31 kt above the approach speed. The energy curve was high during the entire final approach, and even above the high energy boundary during the last mile to the runway, meaning that the aircraft's energy was not well managed by the pilot and that a situation of runway excursion was very likely.

CONCLUSIONS

In this research, three approaches at Eduardo Gomes International Airport (SBGR), were analyzed using actual flight data from a Boeing 737-400 model collected from an FDM system. The objective was to evaluate the aircraft trajectory's energy state during all the approaches to touchdown, in three case studies.

In the first case study, a flight without FDM exceedances was chosen, where the aircraft's energy state slightly above the reference line in the initial approach phase was observed, which was a consequence of the tailwind condition, although the aircraft performed at the expected altitude along all flight paths until touchdown. The pilot managed the aircraft's configuration correctly, as well as altitude, and speed, to perform a perfectly stable approach, right on the reference energy line, from a 9 nm distance on the final segment until crossing the threshold. In this case, it was observed that the energy state of the aircraft was always inside the energy tunnel limit.

The second case study, referred to as a low-energy flight with FDM exceedances was chosen to demonstrate a low-energy state almost until the final approach fix. It was also possible to recognize a low-speed event on the final segment and its correspondence to a sudden drop in the aircraft's energy, clearly visible on the energy curve.

In the third case study, a flight with FDM exceedances was chosen demonstrating a low energy state in the initial approach phase and reverting to a high energy condition on the final approach segment. In this flight, a leveled-off segment with increasing aircraft's energy to the limit and even above the limit on the short final was observed.

In all case studies, the energy tunnel method proved to be an efficient support tool to better understand FDM exceedances since the process of flight data analysis permits the visualization of the whole picture of the approach. The results obtained from the application of the tunnel of energy method depicted in this paper, along with the traditional FDM analysis indicate a great contribution to reduce unstable approaches and consequently have the potential to lead to the reduction of accident rates.

Furthermore, understanding the root causes of an unstable approach, which is highly related to the aircraft's energy condition, contributes to enhanced pilot awareness of the aircraft's energy and its correlation with accidents and incidents, especially in the final approach segment. The specific training of pilots on energy management is essential to avoid situations such as LOC-I, runway excursion, and CFIT.

Finally, additional research on new technologies is of paramount importance to bring into the cockpit a more comprehensive way to support pilots so that they can manage the aircraft´s energy more easily. Pictorial or aural warnings in the cockpit regarding the energy state of the aircraft exceeding the energy tunnel limits would be extremely beneficial for the pilots´ situational awareness on the stabilization of the approaches.

REFERENCES

Chidester, T. R. (2003). Understanding normal and atypical operations through analysis of flight data. *Proceedings of the 12th International Symposium on Aviation Psychology*, (pp. 239-242).

Dillman, B. G. (2015). Flight Operational Quality Assurance (FOQA)–Do Exceedances Tell the Story? *Symposium on Aviation Psychology*, (p. 354).

Federal Aviation Administration. (1998). *Flight Standards Handbook Bulletin for Air Transportation (HBAT) 98-22.* Washington D.C.,USA: FAA.

Federal Aviation Administration. (2004). *AC 120-82 FLight Operations Quality Assurance.* Washington D.C., USA: FAA.

Federal Aviation Administration. (2021). *Airplane Flying handbook.* Washington D.C. (USA): FAA.

Flight Safety Foundation. (2000). *(ALAR Briefing Note 4.2 - Energy Management.* Alexandria, VA (US): FSF. Retrieved from FLight Safety.

Flight Safety Foundation. (2009). *ALAR Briefing Note 7.1 - Stabilized Approach.* Alexandria, VA (USA): FSF.

International Air Transport Association. (2017). *IATA Air Accident Database.* Montreal (CA): IATA.

International Civil Aviation Organization. (2022). *Annex 6 - Operation Of Aircraft - Part I - International Commercial Air Transport - Aeroplanes.* Montreal (CA): ICAO.

NASA. (2004). *Aviation Performance Measuring System* . Moffet Field (CA), USA: Aviation Performance Measuring System .

National Transport Safety Board. (1997). *Safety Recommendation A-97-85.* Washington D.C.,USA: NTSB.

The Boeing Company. (2010). *Boeing 737 Flight Crew Training Manual.* Seattle (WA), USA: The Boeing Bompany.

The Boeing Company. (2012). *Jet Transport Performance Methods.* Seattle, Washington (USA): The Boeing Company.

Appendix I: Flight Analysis Graphs

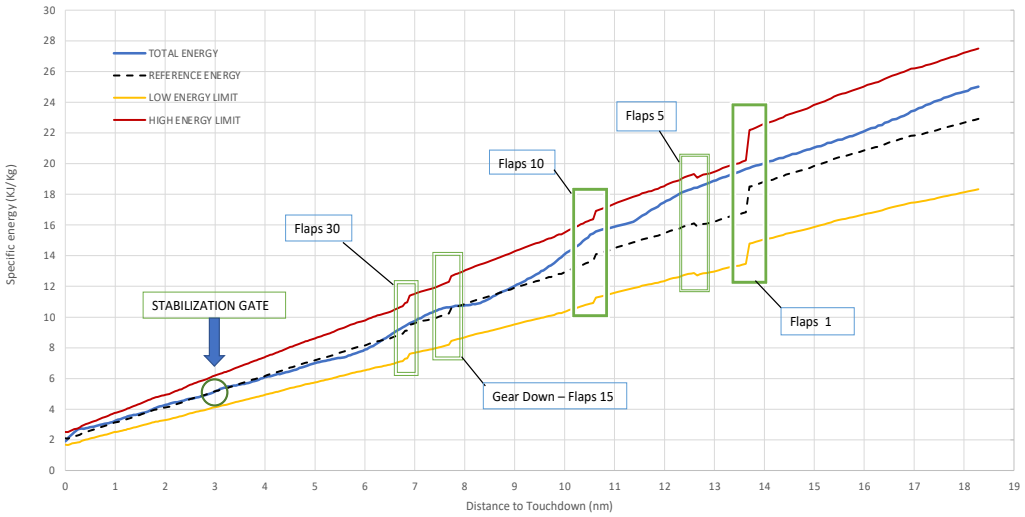


Figure 3a: Regular Approach Energy Tunnel

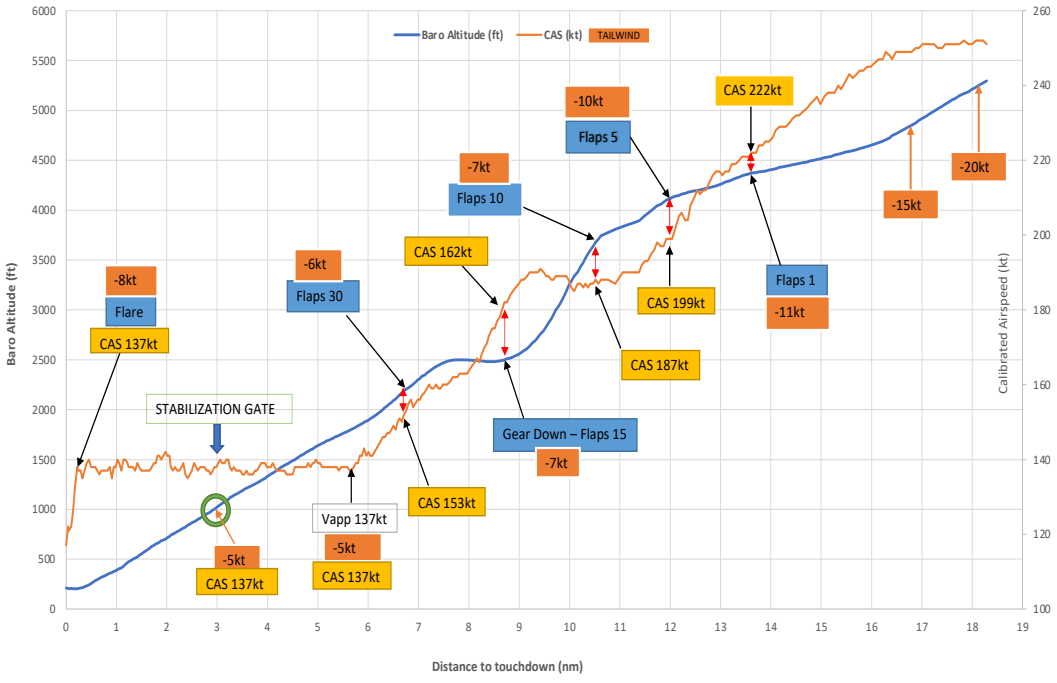


Figure 3b: Regular Approach Altitude-CAS plot

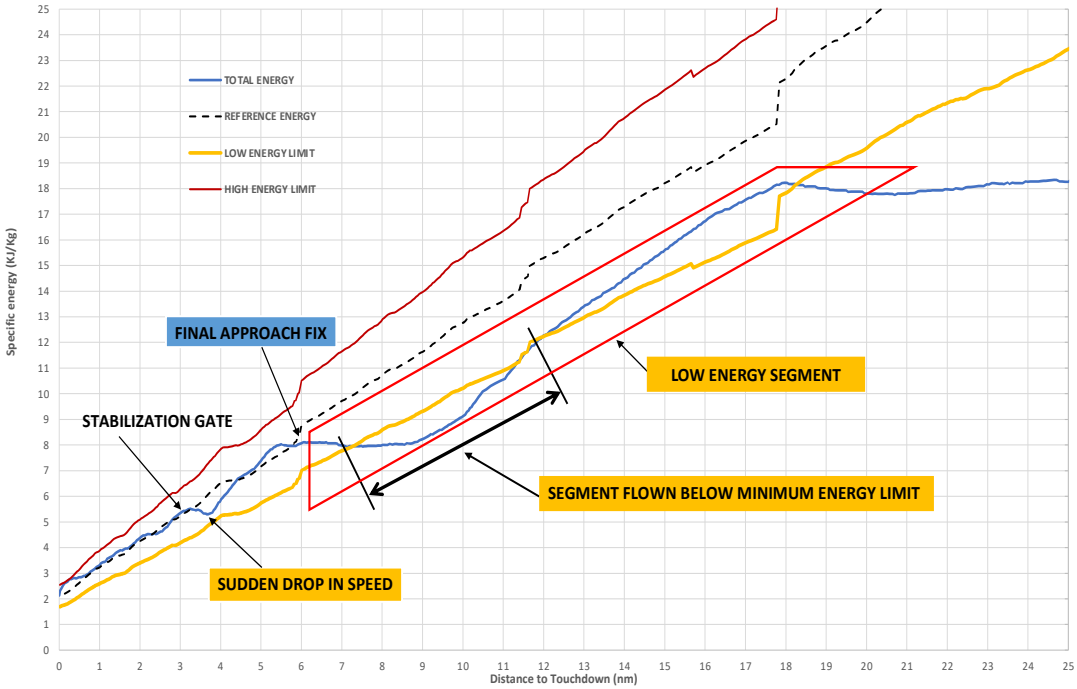


Figure 4a: Low Energy Approach Tunnel

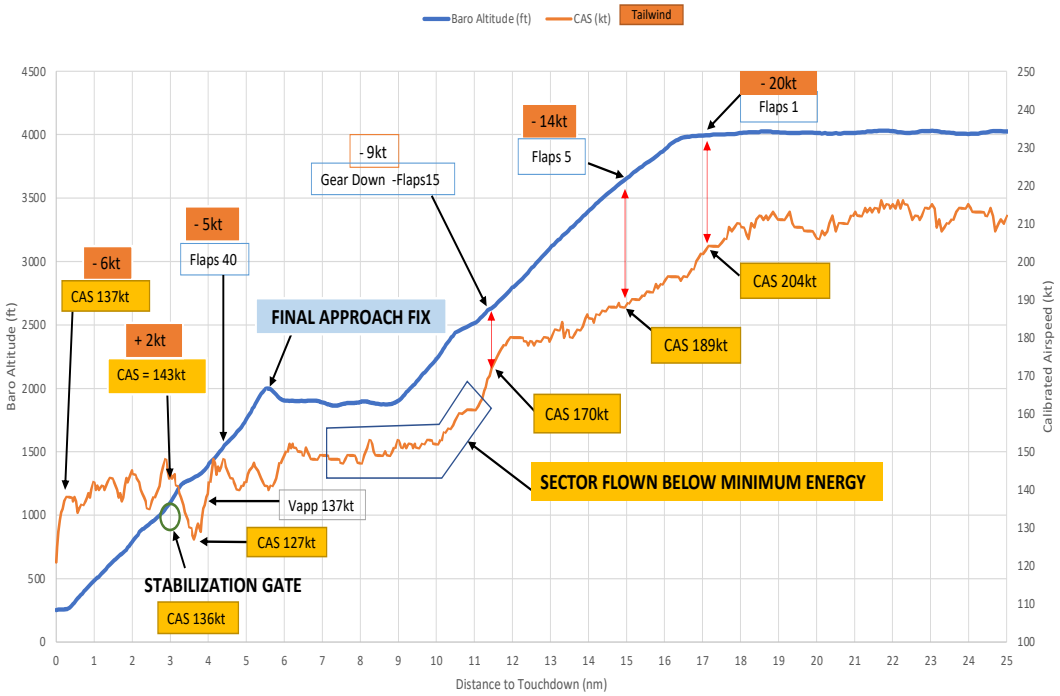


Figure 4b: Low Energy Approach Altitude-CAS plot

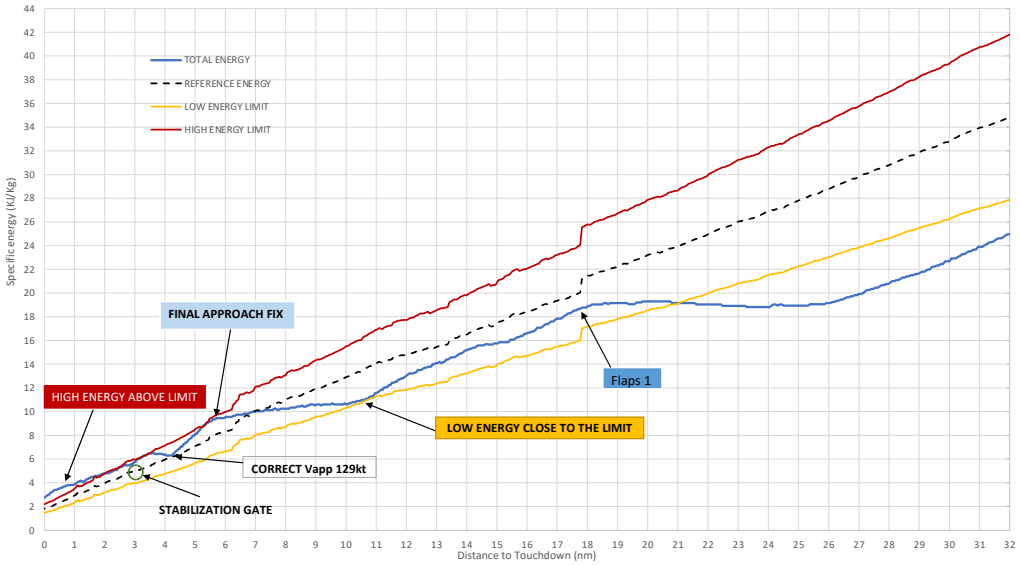


Figure 5a: High Energy Approach Tunnel

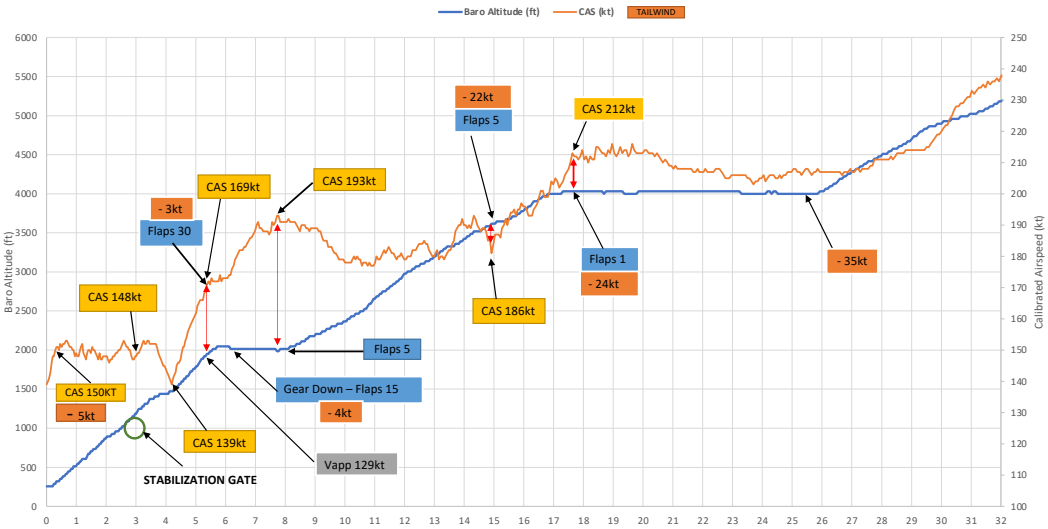


Figure 5b: High Energy Approach Altitude-CAS plot

Explainable Artificial Intelligence applied to active runway configuration and dynamic airport capacity prediction

Igor Galhano Gomes*, Mayara Condé Rocha Murça, Marcelo Xavier Guterres
Aeronautics Institute of Technology

*** Corresponding author e-mail address:** igorgalhanog@gmail.com

PAPER ID: SIT2298

ABSTRACT

Despite the widespread use of machine learning methods in a variety of studies in the aviation industry in recent years, there has been limited progress in achieving explainability for the results generated by these models. Given the importance of explainable predictive models for trustworthy decision support in the context of Air Traffic Management (ATM), this study explores the use of Multilayer Perceptron and Random Forests, along with a Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) approach, to develop predictive models capable of generating interpretable forecasts of airport runway configuration and dynamic capacity. The machine learning process is based on historical weather, flight demand and actual air traffic movement data for Sao Paulo/Guarulhos International Airport. The predictive models are able to deliver runway configuration forecasts with an accuracy higher than 87.73% and arrival/departure capacity forecasts with errors as low as 1.309. With LIME, consistent explanations are obtained through the models on each prediction. An interactive predictive tool is created to output the runway configuration and capacity forecasts as well as the main contributing factors for each forecast within a 24-hour forecasting horizon. This research aims to improve decision-making by integrating predictive models and explanatory models into applications that provide useful information for ATM.

Keywords: Airport Capacity, Runway Configuration, Machine Learning, Explainable Artificial Intelligence, LIME.

1. INTRODUCTION

Airport capacity can be defined as the maximum number of takeoffs and landings that an airport can handle within a period of time while meeting all air traffic rules and service level criteria. For long-term planning and strategic demand management, a theoretical capacity is calculated based on specific runway configuration and operational conditions using analytical and simulation models. Some of the key factors considered for this estimation are the average runway occupancy time and the required wake turbulence separations between aircraft (DECEA, 2015).

However, airport capacity can vary significantly during the course of a day due to the dynamics of relevant operational factors such as weather. Imbalances between the planned demand and the dynamic capacity can result in significant flight delays because flights that could not be conducted at the scheduled time due to the capacity constraint will be pushed into a waiting queue, along with subsequent flights. Air Traffic Flow Management (ATFM) is a fundamental service provided by the Air Traffic Management (ATM) system to mitigate the impacts of such imbalances. It is accomplished through strategies to adjust the traffic flows in order to match demand with the available capacity at any given moment. Therefore, for the purposes of Air Traffic Flow Management (ATFM), it is necessary to forecast the dynamic airport capacity in real time based on evolving operational conditions. This dynamic capacity estimation is of particular interest in this study.

One of the main factors that affect the dynamic capacity of an airport is the active runway configuration. The runway configuration is the set of runways and their active thresholds that are being used for arrivals and departures at a given moment, as determined by air traffic controllers (ATCOs). It depends on several factors such as wind direction and speed, ceiling/visibility conditions, flight demand, environmental constraints (e.g., noise abatement) and coordination with other airports located nearby (Avery and Balakrishnan, 2015). Accurately predicting the runway configuration is key to accurately predicting dynamic airport capacity.

Several studies have worked towards the development of Machine Learning (ML) models to predict runway configurations and capacity towards supporting ATFM decisions. However, providing only predictions without explanations is insufficient in the context of ATM decision support, as safety is a priority. ATCOs are responsible for the decisions made and, therefore, need to understand the reasons behind the results generated by machine learning models. This allows them to assess the conditions that led to certain model predictions and possibly validate those predictions.

In this context, Explainable Artificial Intelligence (XAI) arises as a suitable approach to make the results of black-box ML models understandable and explainable to humans. XAI models are capable of generating explanations for ML models, maintaining their predictive performance while providing an understanding of the results obtained. This approach increases confidence in the predictions provided by the models, contributing to building trust in automated decision support systems and enhancing their usability.

This work presents a XAI framework to develop explainable machine learning-based predictive models that can generate interpretable forecasts of airport runway configuration and capacity. We use supervised learning algorithms - Multilayer Perceptron (MLP) and Random Forests (RF) - for learning the predictive models from historical demand, weather and traffic data, along with a Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) approach for generating forecast explanations. The models are developed for Sao Paulo/Guarulhos International Airport (GRU). As the largest airport in South America, it often needs ATFM measures to balance demand with capacity. The application of the models is demonstrated with a prototype interactive tool that outputs the runway configuration and capacity forecasts as well as the main contributing factors for the forecasts for a 24-hour planning horizon.

The proposed methodology paves the way for integrating these models into applications that offer a wide range of useful information for ATM, leading to improved decision-making and promoting more effective management of airport capacity and air traffic flows.

2. LITERATURE REVIEW

In the aviation industry, ML methods have been employed in a wide range of studies in recent years. However, there has been limited progress in the explainability of the results generated by these models. Explainability is a field that needs to be further explored for these methods to be accepted by users and authorities (Degas et al., 2022).

For runway configuration prediction, discrete choice models were developed to predict runway configuration at LaGuardia Airport (LGA) and San Francisco International Airport (SFO) over 15-minute, 3-hour, and 6-hour planning horizons, using a recursive approach (Avery and Balakrishnan, 2015). In another study, XGBoost and Random Forests models were created to predict runway configuration at the six largest airports in the United States, also using a recursive approach with prediction horizons of up to 6 hours (Rebollo et al., 2021).

In the field of capacity prediction, various studies have employed deep learning approaches to achieve more accurate results. Models such as Multilayer Perceptron (MLP), Recurrent Neural Networks (RNN), and Long-Short Term Memory (LSTM) have been developed to predict airport capacity at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport (ATL), which were then used for capacity prediction at Boston Logan International Airport (BOS) through transfer learning (Choi and Kim, 2021). More complex models have also been developed in other studies, such as attention-based deep learning models that combine MLP and LSTM to predict Airport Arrival Rates (AAR) at Hong Kong International Airport (HKG) (Jiao et al., 2023), and convolutional neural network models to predict both runway configuration and AAR in multi-airport systems using gridded weather forecast data (Wang and Zhang, 2021).

In the context of Explainable AI (XAI) applied to ATM, Woo et al. (2022) developed an interactive interface that presents results and explanations of XGBoost predictions for runway exit using trajectory data and meteorological conditions. LIME explanations were generated based on the predictions of the trained models.

The fields of runway configuration prediction, dynamic capacity prediction, and XAI applied to ATM still have significant potential for further exploration. The application of existing XAI techniques and the development of new ones could lead to the creation of various useful applications for ATM. The contribution of this research lies in the integration of ML and XAI methods for the development of interpretable runway configuration and capacity prediction models.

3. METHODOLOGY

Figure 1 provides a schematic overview of the methodological approach, which is detailed in the next subsections.

3.1. Data Collection and Pre-processing

The airport runway configuration and capacity prediction models were created based on historical meteorological, demand and air traffic data for GRU. Weather data was gathered from Meteorological Aerodrome Reports (METAR) and Terminal Aerodrome Forecasts (TAF). Planned flight demand data was collected from the Flight Operations Registration System (SIROS) of the Brazilian Civil Aviation Agency (ANAC). Finally, actual air traffic movement data was gathered from the Air Traffic Control Tower Management System and FlightRadar24.

The data covers six months of operations from July 1, 2022 to December 31, 2022. Data pre-processing was performed to structure the dataset with observations for every 15-minute period. For each 15-minute period, the scheduled and actual arrival and departure rates were calculated. The active runway configuration was determined based on the most frequently used arrival and departure runways in each interval. Missing meteorological data was filled with previous data, since METAR is issued hourly and TAF every 6 hours. Headwind and crosswind components were calculated based on the wind speed, wind direction and runway threshold orientation. The variables are synthesized in Table 1.

The development of the airport capacity prediction model with supervised learning requires knowledge about the actual airport ar-

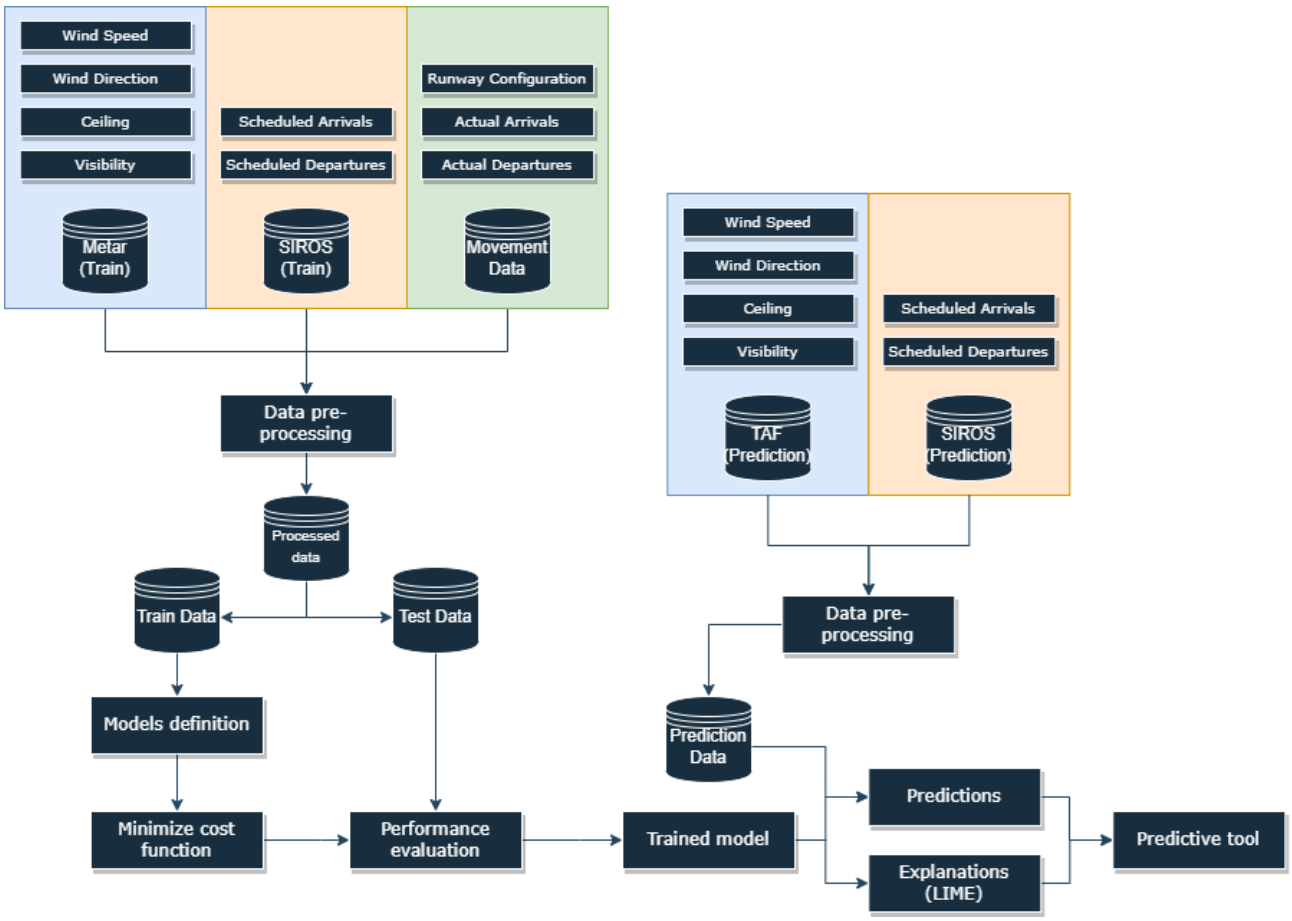


Figure 1 Methodology flowchart.

Table 1 Variables created for modeling

Group	Name	Type
Temporal	local_time	categorical
	day_of_the_week	categorical
Actual operations	runway˙configuration	categorical
	actual_arrivals	numerical
	actual_departures	numerical
Planned operations	scheduled_arrivals	numerical
	scheduled_departures	numerical
Weather	headwind	numerical
	crosswind	numerical
	visibility	numerical
	ceiling	numerical

rival/departure rate (output ”truth”). For this, we used air traffic movement data and developed an empirical method for estimating the capacity from observed airport throughput performance. The purpose of using this method was to identify the periods for which the demand was high enough and the airport was operating under pressure so that arrival/departure rates observed reflected the airport capacity. Otherwise, capacity could be underestimated due to unloaded flight periods. First, the number of aircraft simultaneously in transit from the gate to the runway at the beginning of each interval and the runway throughput for this interval were used to estimate a departure saturation curve for the airport. This curve allows for the estimation of the number of departing aircraft on the ground that leads to runway throughput saturation. After determining this quantity, the data was filtered for periods when saturation occurs, as the number of departures occurring in those periods becomes a good representation of the airport's departure capacity at that moment. Similarly, the number of arriving aircraft within a 40 NM radius from the airport cen-

ter was determined for each time interval, and a saturation curve for landings was estimated. A new database was subsequently generated, containing the time intervals for which arrival saturation occurs.

As additional data preprocessing for modeling and forecasting, one-hot encoding was used for categorical variables, and min-max normalization in the range [0,1] was applied to numerical variables.

3.2. Predictive Modeling

For learning the predictive models, 75% of the dates were used for training, with a portion of this data later separated for validation, and 25% for testing. A classification model was developed for runway configuration prediction and two regression models were developed for arrival and departure capacity prediction, respectively, based on a supervised learning approach. The output variables were $runway_configuration$, $actual_arrivals$ and $actual_departures$, while the features were the remaining variables in Table 1. For the supervised learning process, the Multilayer Perceptron (MLP) and the Random Forests (RF) algorithms were used. As non-parametric methods, they allow for non-linear mapping between input and output.

For training the runway configuration prediction model, binary cross-entropy was chosen as the loss function, and accuracy was employed as the primary performance metric. For the capacity prediction model training, the loss function used was the Mean Squared Error (MSE), while the Root Mean Squared Error (RMSE) was the main performance metric chosen. The hyperparameter tuning was performed through manual search for MLP and grid search for RF based on cross-validation.

Recursive runway configuration models were also developed to achieve improved performance for shorter forecasting horizons. These models use the runway configuration predicted for the previous time period as a feature to predict the current one.

With the trained models, weather forecast data from TAF was used for forecasting over a 24-hour prediction horizon, and the performance metric was recalculated for predictions on the test data using TAF.

3.3. Predictive Model Explanation

To obtain interpretable airport runway configuration and capacity forecasts, a Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) approach was used to generate explanations for the predictions delivered by the machine learning models. LIME is a group of model-agnostic interpretable models for local explanations. It relies on training simpler surrogate models, such as linear models, to generate explanations for a single prediction.

Explaining a model means providing textual or graphical representations that enable the qualitative interpretation of the relationship between the model's prediction and the variables used to generate that prediction (Ribeiro et al., 2016). Specifically for LIME, explanations involve quantifying the contribution of the most relevant variables in a given prediction, which is determined by the weights obtained for each variable in the surrogate model.

Let f be the trained model to be explained, and g be the surrogate model used to generate explanations, belonging to a model family G. Also, let x be a data instance, and π_x be the neighborhood of x. LIME algorithm optimizes the parameters of g to determine the explanation as follows:

$$\xi(x) = argmin_{g \varepsilon G}(L(f,g,\pi_x) + \Omega(g)), \quad (1)$$

where L is a loss function that measures how unfaithful g is in approximating f in the neighborhood defined by π_x, and Ω is a measure of the complexity of the explanation g (Ribeiro et al., 2016).

In this study, Ridge Regression was used for explanations, based on a weighted Mean Squared Error loss function with an L2 regularization term to penalize complexity. The neighborhood data was obtained through Gaussian sampling.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Exploratory Data Analysis

GRU has two closely spaced parallel runways that are typically operated in two main configurations: $10R|10L$ (i.e., landings on runway threshold 10R and takeoffs on runway threshold 10L) and $28L|28R$ (i.e., landings on runway threshold 28L and takeoffs on runway threshold 28R). Figure 2 displays the frequency of use of these runway configurations based on the processed data.

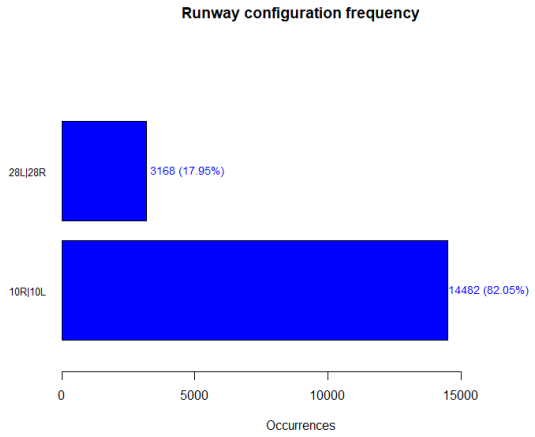


Figure 2 Frequency of use of main runway configurations at GRU.

Figure 3 shows the extremely high correlation between GRU's active runway configuration and headwind component. As expected, runway configurations are typically chosen to avoid tailwind components. Therefore, *headwind* is expected to be a relevant feature for runway configuration prediction.

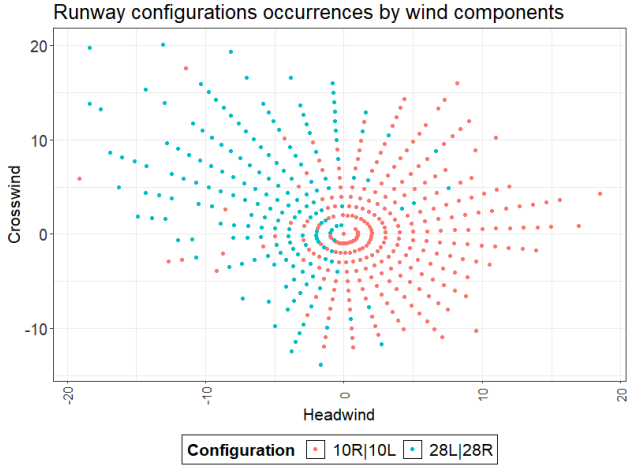


Figure 3 Runway configuration occurrences and observed wind components at GRU.

After the initial data preprocessing described in Section 3., we obtained the arrival and departure throughput performance curves for GRU, as shown in Figures 4 and 5. The airport is found to be saturated for arrivals when the number of aircraft in the terminal area exceeds 9. Similarly, the airport is found to be saturated for departures when the number of aircraft in transit from the gate to the runway exceeds 8.

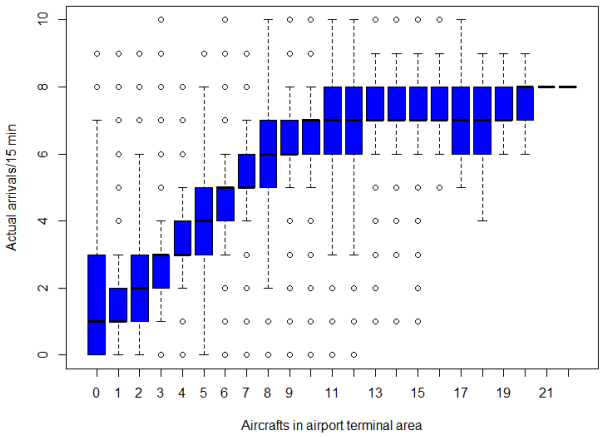


Figure 4 Arrival throughput performance curve.

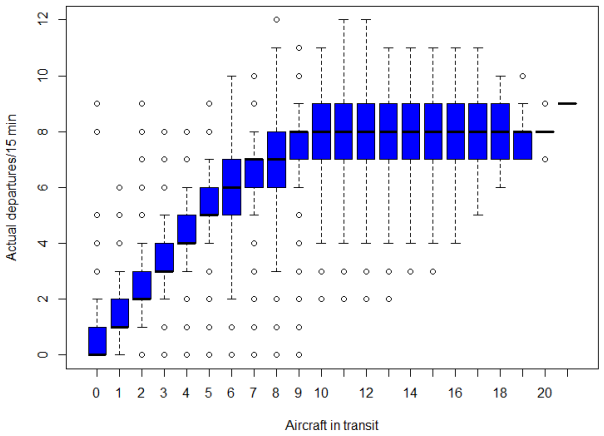


Figure 5 Departure throughput performance curve.

Considering the demand levels described above, the data was then filtered to keep only the observations associated with the periods when the airport was operating at capacity. Figures 6 and 7 show that the filtering process achieved the desired effect, as the distribution of arrival and departure throughput rates became less impacted by the hourly demand patterns. Therefore, it is reasonable to assume that the arrival and departure rates reflect the airport capacity for the filtered instances.

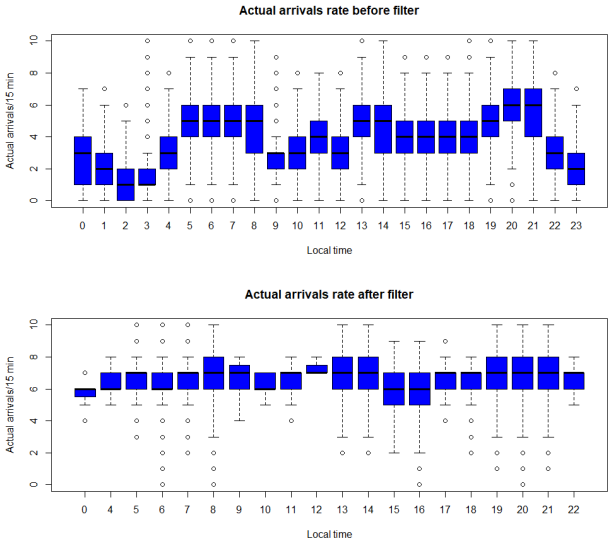


Figure 6 Distribution of arrival rates by hour of the day before and after the filtering process.

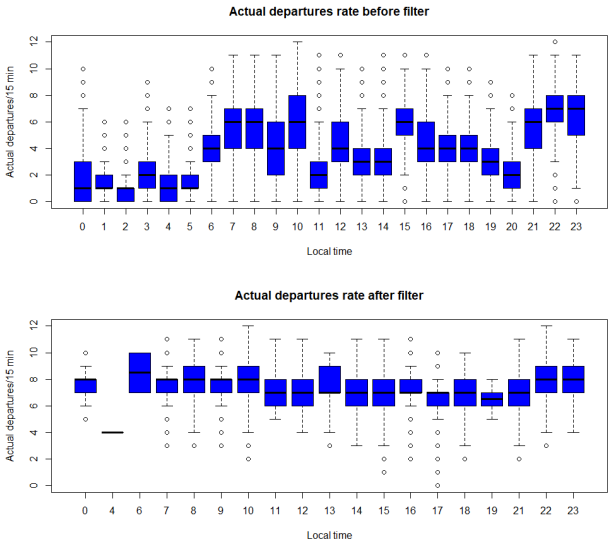


Figure 7 Distribution of departure rates by hour of the day before and after the filtering process.

4.2. Predictive Model Performance

For MLP, through manual hyperparameter tuning with 100 epochs, the architectures shown in Table 2 achieved the best performance. Dropout regularizers were applied to the hidden layers with a probability of 10%. Training was performed using the Adam algorithm with a batch size of 128 and a learning rate of 0.01, with 10% of the training data used for validation.

Table 2 MLP models' architecture

Prediction model	*Neurons*	*Activation function*
Runway configuration	[60, 35, 1]	[tanh, tanh, sigmoid]
Arrival capacity	[60, 35, 1]	[tanh, tanh, linear]
Departure capacity	[60, 35, 1]	[tanh, tanh, linear]

For the RF models, 500 trees were used to train with 4-fold cross-validation and 2 repetitions to optimize the number of features used to generate decisions at each tree node. Figures 8, 9 and 10 display the importance obtained for each feature in the trained RF models. We observed that the most relevant feature for the runway configuration prediction model was *headwind*, consistent with the results shown by the exploratory data analysis. For the capacity prediction models, the most relevant feature was *local_time*.

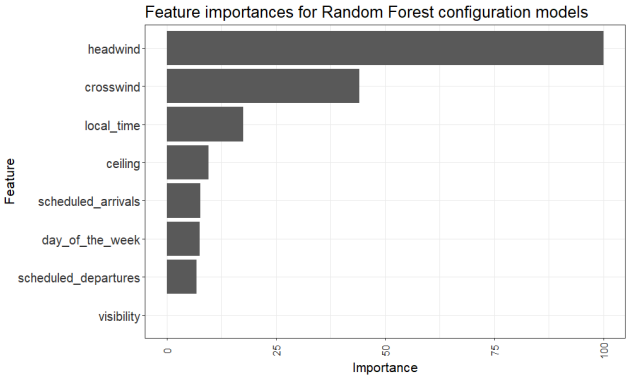


Figure 8 Feature importance for the RF runway configuration prediction model.

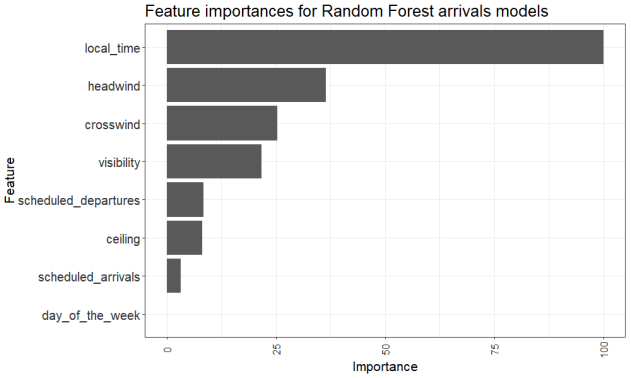


Figure 9 Feature importance for the RF arrival capacity prediction model.

The predictive performance of the models on the test data is summarized in Table 3. Over-

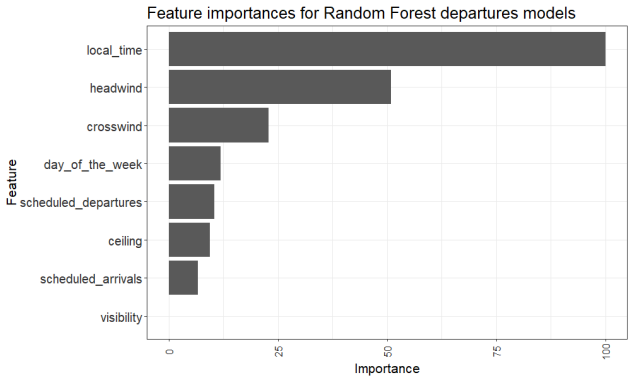


Figure 10 Feature importance for the RF departure capacity prediction model.

all, the MLP models showed a slightly better performance than the RF models, with an accuracy of 87.73% for runway configuration predictions and a RMSE of 1.113 and 1.309 for arrival and departure capacity predictions, respectively.

Table 3 Predictive model performance

Performance	*MLP*	*RF*
Runway configuration prediction accuracy	87.73%	87.05%
Arrival capacity prediction RMSE	1.113	1.156
Departure capacity prediction RMSE	1.309	1.389

Table 4 shows the accuracy obtained for the recursive MLP and RF runway configuration prediction models at different forecasting horizons. The performance of these models is also compared to that of a baseline model, which predicts the runway configuration as the current one (constant prediction) throughout the entire forecasting horizon. It is observed that for short-term forecasting horizons, the previous configuration serves as a good estimate for the next configuration, yielding even better performance than the learned models for a 15-minute horizon. However, for longer forecast horizons, a significant improvement in predictive performance is obtained with the machine learning models.

Table 4 Runway configuration prediction model performance as a function of the forecast horizon

Forecasting horizon	*MLP*	*RF*	*Baseline*
15 minutes	98.52%	98.68%	98.73%
1 hour	98.02%	98.29%	95.13%
2 hours	96.92%	97.49%	91.13%
3 hours	95.73%	96.51%	88.09%
6 hour	92.10%	92.42%	80.65%
12 hours	88.09%	85.12%	76.94%
24 hours	85.63%	80.63%	75.65%

The machine learning models were also compared with an alternative baseline model that predicts the runway configuration based on the headwind signal (if greater than 0, $10R|10L$, and $28L|28R$, otherwise). Figure 11 summarizes the predictive performance of all models as a function of the forecast horizon. It is clearly noticeable that the learned models provided an improvement in prediction accuracy when compared to the baseline models, with the exception of very short-term predictions (15-minute forecast horizon). The longer the forecast horizon, the larger the performance improvement.

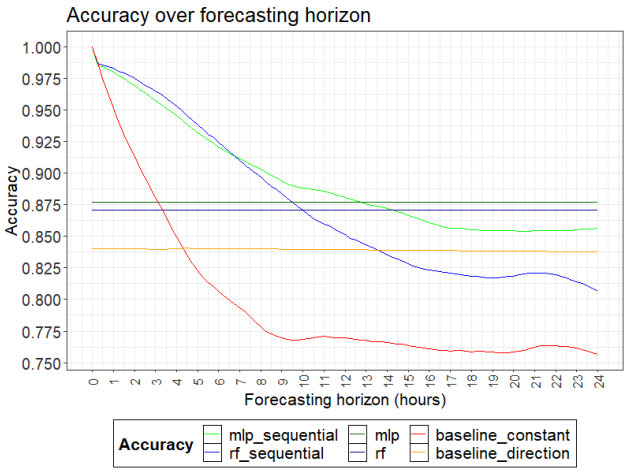


Figure 11 Accuracy as a function of the forecast horizon for the runway configuration prediction models

4.3. Explained Predictions

The trained models were used to generate explainable predictions using LIME with TAF meteorological data for a 24-hour prediction horizon. An interactive tool was created to display runway configuration and arrival/departure capacity predictions and explanations hourly based on TAF forecasts, as shown in Figure 12.

For a specific instance (2023-06-27 06:00:00) characterized by Low Instrument Flight Rules (LIFR) weather condition (Figure 14), models' explanations were obtained and are shown in Figure 13. We observed consistency in the models' explanations for the analyzed prediction instance, as they captured the influence of low visibility and low ceiling on the reduced departure capacity forecast.

5. CONCLUSIONS

This work combined Explainable Artificial Intelligence (XAI) and machine learning techniques to develop explainable predictive models capable of generating interpretable forecasts

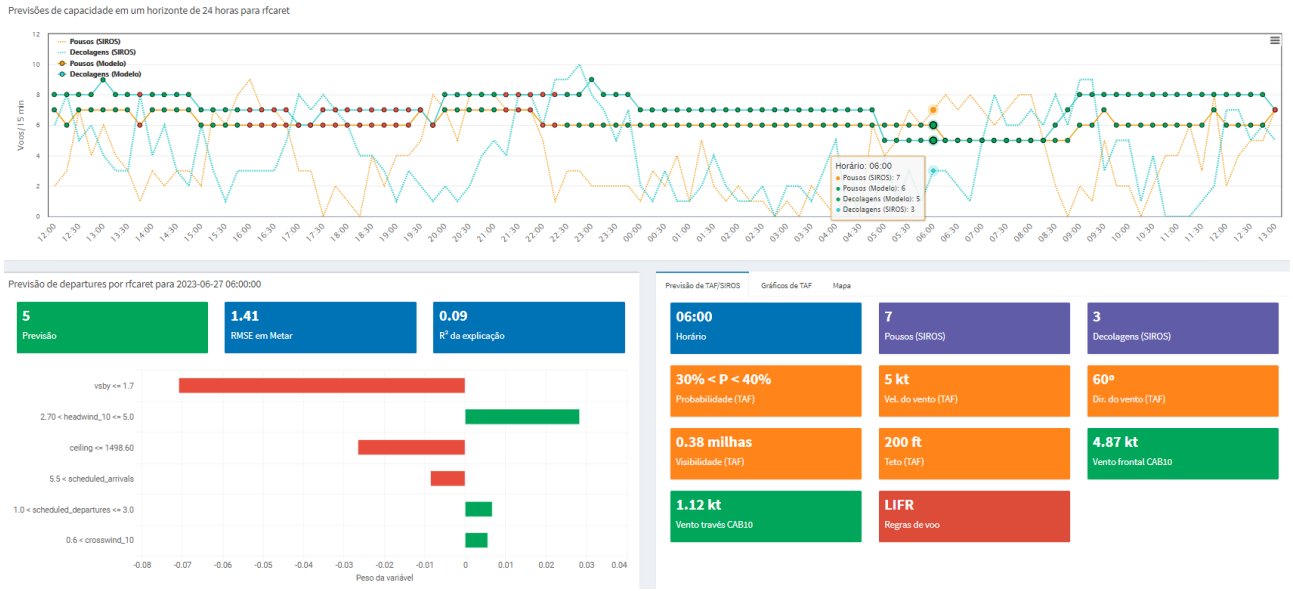


Figure 12 Interactive tool with explained runway configuration and capacity predictions for a 24-hour forecasting horizon.

Figure 13 LIME explanations for MLP and RF departure capacity models for a specific prediction instance.

of airport runway configuration and capacity towards trustworthy automated decision support in air traffic flow management. Based on historical demand, weather and traffic data for Sao Paulo/Guarulhos International Airport, the predictive models were learned using the Multilayer Perceptron (MLP) and Random Forests (RF) algorithms. A Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) approach was then used to generate forecast explanations.

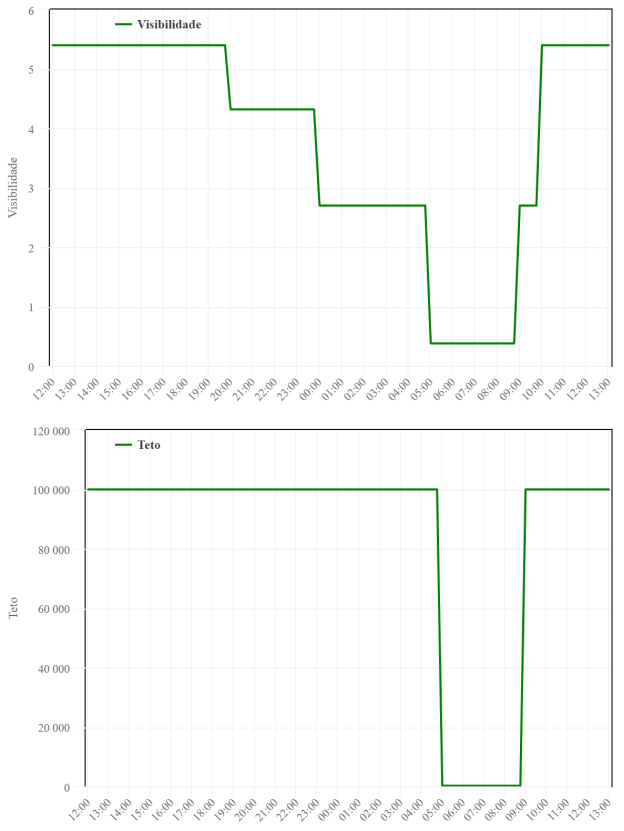


Figure 14 TAF visibility and ceiling forecast for a specific prediction instance.

The learned models showed good predictive performance, with the MLP models delivering runway configuration predictions with an accuracy of 87.73% and arrival and departure capacity predictions with a RMSE of 1.113 and 1.309, respectively. Moreover, a significant improvement in predictive performance was observed when the learned models were compared with baseline models, especially for longer forecast horizons. The LIME framework proved to be useful in quickly determining the variables that most influenced the model predictions, and the main explanations were found to be consistent across the different models learned.

For future work, potential predictive performance improvements might be explored with the use of other machine learning algorithms suitable for sequence data, such as Recurrent Neural Networks (RNN). Different surrogate models might be considered to generate local explanations with LIME in order to identify the one that best fits locally the predictions. Finally, the methodology presented in this research can be extended to other applications to develop interpretable predictive models that can be integrated into novel trustworthy decision support tools in aviation.

References

Avery, J. and Balakrishnan, H. (2015). Predicting Airport Runway Configuration: A Discrete-Choice Modeling Approach. In *Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, pages 1–11, Lisbon, Portugal.

Choi, S. and Kim, Y. J. (2021). Artificial neural network models for airport capacity prediction. *Journal of Air Transport Management*, 97:102146.

DECEA (2015). Portaria DECEA n° 78/DGCEA, de 23 de março de 2015. Aprova a reedição do MCA 100-14, Manual que trata da 'Capacidade do Sistema de Pistas'. Boletim do Comando da Aeronáutica.

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., Flumeri, G. D., Borghini, G., Babiloni, F., and Aricò, 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).

Jiao, Q.-Y., Li, N., Zheng, Z.-G., Feng, Z., Ren, G.-S., and Qiang, Y.-G. (2023). Attention Mechanism-Based Deep Learning Method for Predicting Airport Acceptance Rate: A Case Study of Hong Kong Airport. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 55(2):185–200.

Rebollo, J., Khater, S., and Coupe, W. J. (2021). A Recursive Multi-step Machine Learning Approach for Airport Configuration Prediction. In *AIAA AVIATION 2021 FORUM*, page 2406.

Ribeiro, M. T., Singh, S., and Guestrin, C. (2016). "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '16, pages 1135–1144, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Wang, Y. and Zhang, Y. (2021). Prediction of runway configurations and airport acceptance rates for multi-airport system using gridded weather forecast. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 125:103049.

Woo, C. J., Goh, S. K., Alam, S., Ferdaus, M. M., and Ellejmi, M. (2022). A runway exit prediction model with visually explainable machine decisions. In *2022 International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2022)*, pages 1–9.

INFLUÊNCIA DA RECONFIGURAÇÃO DE PISTAS NA OCORRÊNCIA DE ESPERAS EM VOO: UM ESTUDO DE CASO NO AEROPORTO INTERNACIONAL DE GUARULHOS

Ivan M. da Silva*, Alessandro S. de Freitas, Jean P. O. Lima, Pollyanne E. da Silva, Rafael De A. Almeida, Adriano D. da Silva and André L. E. Melo
Airspace Control Institute - ICEA, Research Department

*** Corresponding author e-mail address:** matiasims@decea.mil.br

PAPER ID: SIT2284

ABSTRACT

A operação dos aeroportos está diretamente relacionada às condições meteorológicas, especialmente à direção e intensidade dos ventos. Fatores como mudança na direção e intensidade do vento, podem gerar riscos para as operações de pousos, que desencadeiam eventos de reconfiguração de pista (ou troca de cabeceira). Essa reconfiguração pode resultar em atrasos, acúmulo de voos em fase de aproximação e, por consequência, o aumento no consumo de combustível, ampliando as emissões de CO_2, uma vez que manobras nessa fase são menos eficientes. Esse acúmulo de voos esperando autorização para pouso é denominado Efeito de Fila. Neste cenário, até que o voo receba autorização para pouso, diversas medidas ATFM podem ser aplicadas, como a Espera em voo. O trabalho propõe avaliar a influência da reconfiguração de pista na ocorrência de esperas em voo. Inicialmente, foi verificada a relação entre a ocorrência de espera e a reconfiguração de pista, por meio do teste Qui-quadrado com $p < 0,001$. Além disso, o teste de Wilcoxon indicou que o evento de reconfiguração de pista ocasiona uma diferença na mediana de esperas quando comparados os períodos de 3 horas antes e 3 horas depois da reconfiguração de pista, com $p < 0,001$. Os resultados indicaram que a reconfiguração de pista exerce influência na ocorrência de espera em voo no aeroporto internacional de Guarulhos.

Keywords: Controle de Tráfego Aéreo, Espera em voo, Reconfiguração de Pista, Troca de Cabeceira.

1. INTRODUCÃO

Aprimorar a eficiência da aviação comercial tem um impacto significativo tanto na economia quanto no meio ambiente. Custos de combustível da aviação representam pelo menos 30% dos custos operacionais das companhias aéreas, que por sua vez acabam por ser repassados aos passageiros, de acordo com o Anuário do Transporte Aéreo, disponibilizado pela ANAC (2022). Segundo a ICAO (2016b) o Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) é um serviço estabelecido com o objetivo de contribuir para um fluxo de tráfego aéreo seguro, ordenado e eficiente.

Com o objetivo de assegurar a eficiência e a segurança dos voos, é possível impor restrições de fluxo, denominadas medidas ATFM. Uma dessas medidas é a chamada espera em voo, que visa gerenciar o tráfego aéreo e evitar congestionamentos. A prática da espera envolve a determinação, por parte do controlador, de quais aeronaves devem executar manobras elípticas ou circulares em torno de um ponto de referência chamado "Fixo", conforme ilustrado na Figura 1. Esse fixo é um ponto geograficamente definido, em relação ao qual uma aeronave pode informar sua posição conforme Siewerdt (2010).

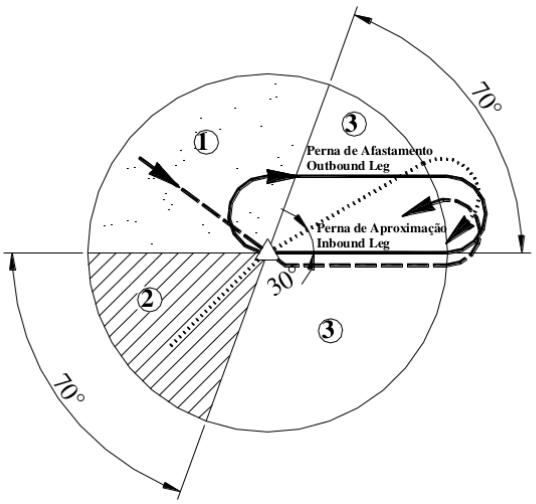


Figure 1 Procedimento de entrada em espera.
Fonte: ICA 100-37 DECEA (2020)

Segundo Reynolds (2014), de forma objetiva, a ineficiência do voo é definida como qualquer alteração que causa uma trajetória diferente daquela quadridimensional (latitude, longitude, perfil vertical e perfil de velocidade) ótima em termos de consumo de combustível. Afirma ainda que a ineficiência do voo tem diferentes impactos potenciais dependendo das fases do voo. Ao analisar as etapas de voo Reynolds (2014) apresenta alguns resultados relevantes sobre a ineficiência do voo, tais como: cerca de 20% a 25% de toda a ineficiência lateral do voo ocorre em situações de esperas e vetoração (resultados para aviação doméstica dos US e Europa), que representa em torno de 20% de queima adicional de combustível.

As esperas em voo são utilizadas como um atraso tático, seja por demanda do controle de tráfego aéreo, como saturação do espaço aéreo, meteorologia ou atrasos de aproximação. No Brasil, no segundo semestre do ano de 2021, foram identificadas 2.062 esperas, equivalente a 30.100 minutos (502 horas) de esperas e 1.090 toneladas de consumo adicional de combustível, aproximadamente. Esses números refletem a carência de melhorias no desempenho em relação à area de eficiência, a fim de alcançar os objetivos elencados no GANP (Global Air Navigation Plan) ICAO (2016a).

Christien et al. (2019) decompõe a ineficiência em duas partes: a parte individual, relacionada à algum evento do próprio voo; e outra parte de "fila" relacionada à ineficiência propagada posteriormente aos demais voos, refletindo em um efeito reacionário. A conclusão foi de que o tempo adicional de "fila" constitui a maior parte do tempo adicional do voo.

A maioria dos principais aeroportos está equipada com múltiplas pistas e, a qualquer momento, um subconjunto dessas pistas (e direções de tráfego associadas) é selecionado para chegadas e partidas das aeronaves. Um fator crítico na determinação da capacidade aeroportuária é a seleção de pistas, conhecida como configuração de pista segundo Ramanujam & Balakrishnan (2015).

Para uma reconfiguração de pista ocorrer são considerados muitos fatores, como: condições meteorológicas (vento e visibilidade), demanda prevista de chegada e partida , considerações ambientais, como procedimentos de redução de ruído e coordenação de fluxos com aeroportos vizinhos. As mudanças na configuração da pista exigem maior coordenação

entre os controladores de tráfego aéreo da torre ao aeroporto e as tripulações da aeronave e de terra e, portanto, mudanças frequentes de configuração não são desejáveis.

Neste contexto, este artigo apresenta um estudo para a avaliar a influência da reconfiguração da pista do Aeroporto Internacional de Guarulhos (SBGR) na aplicação da medida restritiva da gestão do fluxo de tráfego espera em voo, tal correlação demonstra que alterações na operação do aeródromo podem propagar ineficiência no fluxo de tráfego aéreo, como o efeito reacionário. Como resultado deste trabalho esperamos fomentar trabalhos futuros de companhias aéreas e serviços ATFM para o desenvolvimento de soluções que auxiliem no planejamento e execução de suas atividades e, por meio de um processo decisório mais bem informado, diminuir o impacto econômico e, consequentemente, o consumo adicional de combustível e as emissões de CO_2 associado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o escopo deste estudo, foi selecionado o Aeroporto de Guarulhos (SBGR), localizado no estado de São Paulo. A seleção deste aeroporto ocorreu por ter o maior movimento de pousos e decolagens do Brasil, registrando 245.163 movimentos em 2022, de acordo com o Anuário Estatístico de Tráfego Aéreo 2022 do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea, CGNA (2022). O Aeroporto de Guarulhos possui uma configuração de 2 pistas paralelas e próximas, com operação segregada, primordialmente, onde as pistas 10R/28L é utilizada para pouso, enquanto a pista 10L/28R para decolagem, a ilustração do layout do aeroporto pode ser encontrado na Figura 2.

O Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), instituição de ciência e tecnologia, vinculada ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que tem como missão a realização de pesquisas para o aprimoramento da gestão do espaço aéreo brasileiro, disponibilizou duas bases de dados. A primeira delas compreende informações sobre as ocorrências de espera em voo com destino ao Aeroporto de Guarulhos,

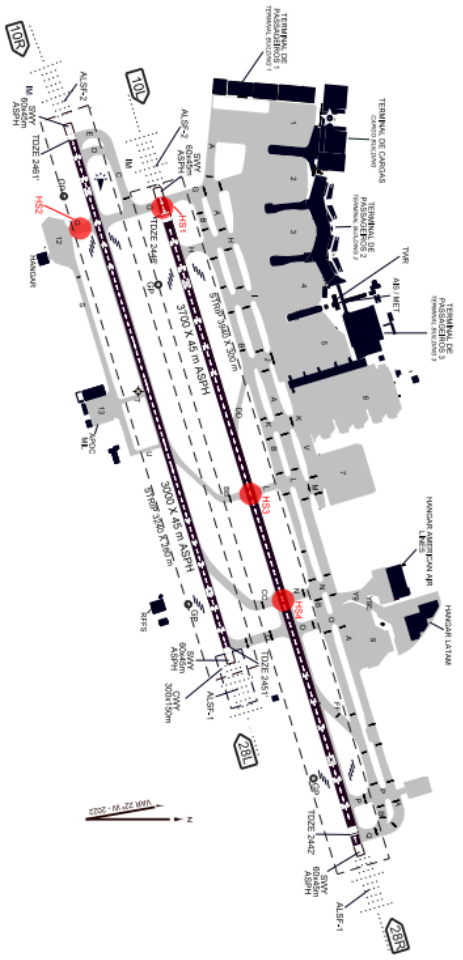


Figure 2 Layout do aeroporto de Guarulhos e suas pistas.

Fonte: AISWEB DECEA (2023)

enquanto a segunda consiste em uma base de dados que registra eventos de mudanças de cabeceiras no referido aeroporto.

A análise apresentada neste trabalho envolveu a integração das bases de dados da seguinte maneira: selecionamos um intervalo de tempo que abrangeu de março a dezembro de 2021, devido ser o período de interseção entre as duas bases fornecidas; com base na taxa-pico de chegadas no Aeroporto de Guarulhos, conforme documentado por DECEA (2022), estabelecemos um período de 3 horas antes e depois do evento de reconfiguração da pista do aeroporto como o intervalo de tempo em que o evento poderia potencialmente influenciar a ocorrência de esperas em voo.

A subseção 2.1. descreve em detalhes os dados recebidos bem como o processamento necessário para a análise em questão. Na subseção 2.2., demonstramos a aplicação dos tes-

tes estatísticos para avaliar as hipóteses relacionadas à propagação de ineficiências no fluxo de tráfego aéreo, considerando a ocorrência de reconfiguração de pista.

2.1. Dados Experimentais

A Tabela 1 apresenta um exemplo da base de dados que contém as informações sobre as ocorrências de esperas em voo. As informações desta tabela é resultado de uma aplicação desenvolvida pelo ICEA que utiliza a técnica de sobreposição de trajetórias de voo, resultando em uma compilação abrangente e precisa sobre a área e o tempo que ocorreram as esperas.

Table 1 Dados de Espera em Voo.

Indicativo	Pouso	Cabeceira	Espera	Duração
TAM3115	2021-04-16 19:27:27	10R	1	00:08:05
AZU4940	2021-04-03 16:48:53	10R	1	00:21:03
GLO4007	2021-04-03 12:16:46	28L	0	00:00:00

O campo *Indicativo* descreve a identificação do voo, no campo *Pouso* são registradas a data e hora de chegada no aeroporto, a *Cabeceira* fornece a informação sobre a pista onde foi realizado o pouso, o campo *Espera* indica se a aeronave realizou a espera em voo e no campo *Duração* é registrado o tempo de espera em voo.

A Tabela 2 apresenta um exemplo da base de dados que contém as informações sobre as reconfiguração de pistas. Essas informações são derivadas do sistema de gerenciamento da torre do aeroporto.

Table 2 Dados de Reconfiguração de Pistas.

Aeródromo	Atual	Anterior	Troca
SBGR	10R	28L	2021-04-03 12:16:46
SBGR	28L	10R	2021-04-03 18:23:32
SBGR	10R	28L	2021-04-03 22:11:41

No campo *Aeródromo* é registrado o indicativo do aeroporto no padrão da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), os campos *Atual* e *Anterior* contém o registro das informações do momento da mudança de pista indicando a pista atual e anterior, respectivamente, o campo *Troca* registra a data e hora da reconfiguração de pista.

As bases de dados foram combinadas por meio de junção utilizando como critério de relacionamento a correspondência entre o registro da hora de pouso com a hora da mudança de configuração de pista.

2.2. Análise Estatística

A aplicação de testes estatísticos é relevante no contexto do gerenciamento de tráfego aéreo, porque permite estabelecer relações objetivas e baseadas em evidências entre diferentes eventos e variáveis. Essas análises permitem observar padrões entre eventos (como mudanças climáticas, atrasos de voo, reconfigurações de pistas e outros fatores) estão interconectados e como podem impactar a eficiência e qualidade do serviço Menéndez et al. (2022).

De acordo com Christien et al. (2019), o efeito de fila é responsável pela maior parte da ineficiência no gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. Desta forma, ao comprovarmos que a troca de cabeceira pode dar início ao efeito de fila, poderíamos dar suporte a tomadas de decisão para mitigar impactos à operação.

O teste qui-quadrado é utilizado para verificar se há associação estatística entre duas ou mais variáveis categóricas Morettin & Bussab (2017). Além disso o teste é não paramétrico, que não requer suposições sobre a distribuição dos dados Almeida & Emmendoerfer (2022). O teste foi utilizado com o objetivo de verificar se há dependência da reconfiguração pista com a ocorrência de esperas.

Para verificar a diferença das esperas antes e depois da reconfiguração de pista foi utilizado o teste de Wilcoxon para amostras pareadas. O teste de Wilcoxon é não paramétrico e tem como objetivo verificar diferença entre as medianas de amostras pareadas. É importante destacar que o teste de Wilcoxon foi escolhido devido à violação dos critérios de pressupostos necessários para a aplicação dos testes paramétricos Triola (2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo foi realizado no Aeroporto de Guarulhos, no período de março a dezembro de 2021, registrando um total de 79.982 voos. É importante destacar que o evento de espera em voo trata-se de um evento considerado de baixa

ocorrência, uma vez que apenas 5,47% ($n = 4.382$) dos voos realizaram esperas, sendo que 18,58% ($n = 814$) dessas esperas ocorreram durante os períodos de até 3h após a reconfiguração de pistas. Vale ressaltar, 13,65% ($n = 10.302$) dos voos que ocorreram durante o período de reconfiguração também não realizaram esperas, conforme ilustrado na Figura 3.

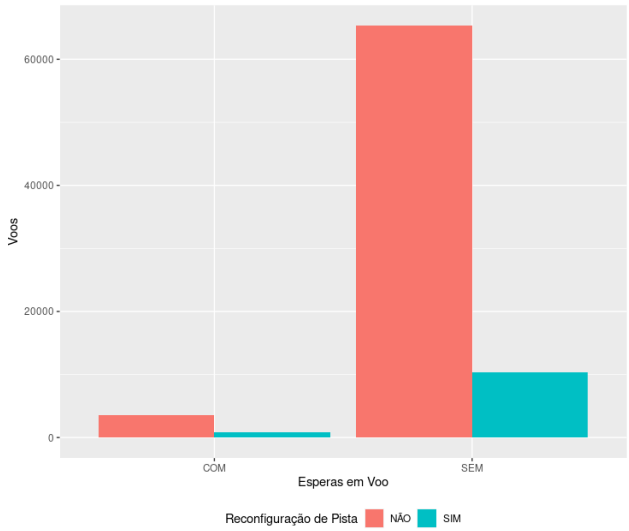


Figure 3 Ocorrência de esperas em voo na reconfiguração de pista no aeroporto de Guarulhos.

Ainda na Figura 3, é possível observar que a proporção de ocorrência de esperas em voo é maior durante os períodos de reconfiguração de pista, em comparação com os períodos em que não há reconfiguração. Complementando os resultados anteriores, pode-se observar que a proporção de voos que realizaram esperas é 3 vezes maior no período de 3h, conforme ilustrado na figura 4.

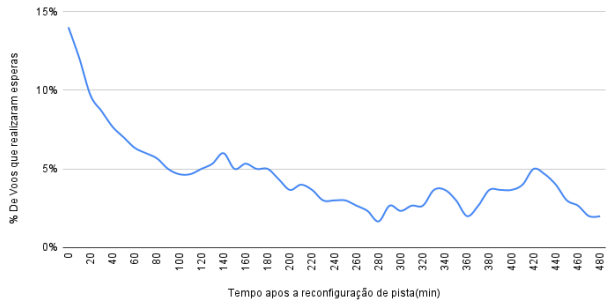


Figure 4 Ocorrência de espera em voo por tempo apos a reconfiguração de pista.

O teste Qui-quadrado, realizado para analisar a relação entre a reconfiguração de pista e a ocorrência de esperas em voo, indicou que existe uma associação significativa entre essas variáveis, com $p < 0,001$. O estudo também buscou verificar se a reconfiguração de pista tem um efeito no padrão de ocorrência de esperas, quando comparados os períodos de 3h antes e após a reconfiguração. Para isso, foi utilizado o teste de Wilcoxon, que é adequado para comparar a diferença entre dois períodos relacionados. O teste constatou que há uma diferença significativa na mediana de ocorrências de esperas, antes e depois da reconfiguração de pista, com um $p < 0,001$.

Os resultados dos testes estatísticos sugerem que a reconfiguração de pistas no Aeroporto de Guarulhos tem impacto significativo na ocorrência de esperas. As reconfigurações de pistas podem ser ocasionadas por condições meteorológicas e outros fatores, resultando assim em atrasos e efeito de fila. O presente estudo fornece informações úteis para gestores buscarem melhorias na gestão espaço aéreo, visando minimizar as esperas em área terminal, reduzindo assim o consumo de combustível e emissão de CO_2 pelas aeronaves.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo indicou que há influência da reconfiguração de pista com ocorrência de espera em voos com destino ao aeroporto de Guarulhos. Dos voos analisados com ocorrência de esperas, 18,58% foram potencialmente ocasionadas pela reconfiguração de pista. Em seguida, verificou-se que o evento de reconfiguração de pista apresenta uma diferença significativa quando comparados os períodos antes e depois da troca de cabeceira. As constatações acima foram avaliadas por meio de testes estatísticos apropriados para cada uma das analises em questão. Para trabalhos futuros, uma vez comprovada a associação, recomenda-se o desenvolvimento de preditores de reconfiguração de pista para embasar o processo decisório por parte dos gestores de fluxo. Para isso, sugerimos o emprego de dados meteorológicos e de gerenciamento de tráfego aéreo na construção desses modelos.

Referências

Almeida, T. C. d. & Emmendoerfer, M. L. (2022). Coprodução de serviços públicos e participação social: o efeito do decreto nº 9.759/2019 na vigência dos conselhos gestores brasileiros, Revista Acadêmica Da Faculdade De Direito Do Recife 94, 211.

ANAC (2022). Anuário do transporte aéreo. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/panorama-do-mercado/anuario-transporte-aereo.

CGNA (2022). Anuário estatístico de tráfego aéreo. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2022.pdf.

Christien, R., Hoffmann, E. & Zeghal, K. (2019). Spacing and pressure to characterise arrival sequencing, Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar.

DECEA (2020). Serviços de tráfego aéreo.

DECEA (2022). Portal operacional cgna. Disponível em: http://portal.cgna.decea.mil.br.

DECEA (2023). Aisweb - informações aeronáuticas. Disponível em: https://ASIWEB/?i=cartas.

ICAO (2016a). Global air navigation plan 2016-2030 Disponível em: https://www4.icao.int/demo/GANP/GANP˙EN.pdf.

ICAO (2016b). Procedures of Air Navigation Service Air Traffic Management.

Menéndez, O. H., Silva, N. A. B. & Pitanga, H. N. (2022). Análise estatística aplicada à gestão do tráfego em interseção semafórica, Research, Society and Development 11, e0511326178.

Morettin, P. A. & Bussab, W. O. (2017). Estatística básica, Saraiva Educação SA,.

Ramanujam, V. & Balakrishnan, H. (2015). Data-driven modeling of the airport configuration selection process, IEEE Transactions on Human-Machine Systems 45(4), 490–499.

Reynolds, T. G. (2014). Air traffic management performance assessment using flight efficiency metrics Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.01.

Siewerdt, E. (2010). Trocando em Miúdos - Dicionário de Termos Aeronaúticos, CR Editorial, São Paulo.

Triola, M. F. (2008). Introdução à estatística Anais do Introdução à estatística, pp. xxvi–310.

OWNERSHIP AND OPERATIONAL COSTS OF eVTOL AIRCRAFT: A COMPREHENSIVE ANALYSIS

Juliana de Oliveira Souza[1], Bruna Lorrane Jardim Ribeiro[2], Polliana Candida Oliveira Martins[3], Victor Rafael Rezende Celestino[4]
Universidade de Brasília, Faculdade do Gama

*** Corresponding author e-mail address:** julianaoliveira.unb@gmail.com[1], brunaljardim@gmail.com[2], polliana.martins@unb.br[3], vrcelestino@unb.br[4]

PAPER ID: SIT2296

ABSTRACT

The implementation of an Urban Air Mobility (UAM) environment presents a substantial challenge, encompassing several factors such as the introduction of a disruptive aircraft concept: eVTOLs. In a scenario characterized by congestion on highways in major urban center, the concept of envisioning a sustainable, reliable, and financially advantageous mode of transportation becomes highly desirable. However, in order to accomplish this goal, it is imperative to comprehend the characteristics and constraints of the novel transportation system, in order to develop a cost model that strives for a sustainable profit margin. Therefore, this study aims to construct a comparative modeling that considers the cost benefits of both fixed-wing and rotary-wing aircraft in a hybrid manner, taking into account the energy requirements of an electric propulsion system. Also, this study proposes an in-depth analysis and comparison of the ownership costs associated with three different eVTOL engineering configurations, in order to highlight the advantages of each one of them. Subsequently, a cost operating model for these aircraft is proposed, taking into account the hybrid behavior presented. As sources of information and comparison, a drone and a helicopter model are utilized to establish comparisons for the vertical takeoff and landing mission components, while a fixed-wing aircraft from the regional aviation group is employed to guide the model during the cruising phase. Based on these results it is possible to draw some conclusions about the potential financial benefits and identify areas where efforts should be focused to establish UAM at an economically viable level.

Keywords: eVTOL, UAM, CASK, Cost Operating Model, Operating Cost.

1. INTRODUCTION

According to the estimation provided by Yang & Lee (2023), it is projected that by 2050, approximately 75% of the global population will be concentrated exclusively within urban areas. This considerable urbanization and the resulting population density present a significant challenge, necessitating substantial investments in transportation infrastructure to keep pace with the rapid growth. Moreover, the imperative emphasis on environmental preservation and the mitigation of emissions intensifies the challenges (Teodorovic & Janic (2017)).

In view of these major challenges currently encountered in urban transportation, the Urban Air Mobility (UAM) has proven to be a new concept of solution to these problems (Cizreliogullari et al. (2022)) , especially when electric vehicles have become an interesting alternative not only for land transportation but also for air transport modes. To achieve this the eVTOLs (electric Vertical Take-off and Landing) will be employed.

Although there are controversies about the use of batteries compared to turbines, for example, studies show that the improvement in energy costs and total operating costs is up to four to eight times lower with the electric system (Moore & Fredericks (2014)).

One of the problems encountered in the development of a cost model for eVTOLs is the difference between the conditions required for vertical take-off/rest and cruise flight (Fredericks et al. (2013)), which directly affects the values of the operations, and it is necessary to establish a balance between the stages.

Thus, the primary objective of this study is to conduct a comprehensive analysis of operational and ownership costs associated with eVTOL aircraft. Through this analysis, accurate cost predictions can be made to guide decision-making in the context of fossil fuel-powered transportation. In terms of acquisition costs, a cost model was developed based on estimates from eVTOL projects proposed by emerging companies in the aeronautical sector. Data were collected for scenarios involving the production of 225 and 450 aircraft. Additionally, the analysis of direct operating costs focuses on evaluating the power requirements for each stage of a typical mission profile of an eVTOL, using drones, helicopters, and regional aircraft as reference points.

2. URBAN AIR MOBILITY (UAM)

Population growth and the incessant increase in land vehicles, mainly for private use, have made traffic congested in large metropolitan areas, which generates even more concerns for the system that ends up becoming complex when the costs of maintaining and controlling traffic, as well as measures to protect the environment and the emission of polluting gases, come to the fore (Teodorovic & Janic (2017)).

According to (NASA (2022)), UAM is an air transportation system that is safe, efficient and offers a variety of functionalities, from the delivery of small packages small packages, passenger transportation and even emergency hospital services.

The idea of the possibility of an air mobility system for urban centers, coupled with the technological leap forward in terms of automation and electrical energy storage, drove the idea of the UAM to fruition, prompting companies from all over the world to start a race to develop prototypes, together with aerospace product suppliers (Bauranov & Rakas (2021)), including eVTOLs.

3. ELECTRIC VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING (EVTOL)

An eVTOL - electric-Vertical Take off and Landing - is defined as an electrically-powered vertical-lift aircraft capable of carrying passengers (NASA (2021)).

According to (Doo et al. (2021)), it is important to emphasize the fact that eVTOL is not intended to compete with or replace other types of aircraft, such as helicopters, but rather to provide an alternative, economical, fast, safe and sustainable means of transportation, with a shorter range and that the missions serve as an aid to conventional aviation, offering a more practical way of getting passengers to their destinations on routes that are not feasible for larger aircraft or helicopters.

According to (Ugwueze et al. (2023)), although there are many different types of eVTOL, these aircraft can be classified into two groups: wingless and high-propulsion, the former being closer to a helicopter, while the latter resembles fixed-wing aircraft. The high-propulsion model tends to be more complex due to the insertion of wings and additional systems that ensure stability and maneuverability.

4. INDIRECT OPERATING COSTS (IOC)

Indirect costs are those that are not necessarily linked to the operation of the aircraft itself, but rather those that provide operational services. The model proposed by Mihara et al. (2021) for component costs is calculated according to Eq.1.

$$VPCost = DevCost + QCCost + FTCost + EngCost + TCost + ManCost + MatCost \quad (1)$$

Where:

- VPCost = Component Cost;
- DevCost = Development Cost;
- QCCost = Quality Control Cost;
- FTCost = Flight Test Cost;
- EngCost = Engineering Cost;
- TCost = Tooling Cost;
- ManCost = Manufacturing Cost;
- MatCost = Cost of Materials.

These cost estimates are important because they provide a good forecast of the resources required for the aircraft's future activities, making it competitive in the market (Ribeiro (2022)).

Once the costs are estimated, it is possible to measure the acquisition value of the aircraft from input variables, e.g. maximum speed, empty mass, production volume. For eVTOL, it is expected that the operational costs per seat/mile will reduce by up to 26% compared to a helicopter (Ribeiro (2022)).

5. DIRECT OPERATING COSTS (DOC)

For the cost model of an eVTOL, the process becomes more complicated due to the aircraft presenting different stages of operation, such as take-off, hover, cruise flight and landing. Each of the mentioned phases requires different power and consequently different costs, sometimes behaving as a rotary wing model, sometimes as a fixed wing (Fredericks et al. (2013)).

During the take-off and landing phase, the most suitable model is close to drones and helicopters, which leads to a cost close to these aircraft. However, the cruise flight is closer to rotary wings due to the flight behavior and the economy generated. Due to these factors, it is interesting that the operating costs of an eVTOL are modeled in a hybrid way, taking advantage of the advantages of each aircraft. What is common between the phases is the fact that the costs will always be calculated taking into account the power required by the eVTOL for each of them.

The operating costs of an aircraft, regardless of its model, consider several factors that can be classified as fixed or variable (Rath et al. (2010)). As the focus of this work is on the costs of the operation itself (variables), the main factors will be the expenses with maintenance and fuel/batteries, so that, in the end, it will be possible to obtain values by sections and arrive at a more approximate CASK value.

6. RESULTS

6.1. IOC

In order to estimate the VPCost, directly linked to ownership costs, data related to three different generic eVTOLs (A, B,and C) was collected. The cost analysis is made in two scenarios:

-Scenario 1 - 225 eVTOls are produced;

-Scenario 2 - 450 eVTOls are produced.

Figures 1 and 2 show that in some cases, when there is an increase in demand, there can be a significant reduction in costs, however, this does not work for all models, as it depends on each type of aircraft.

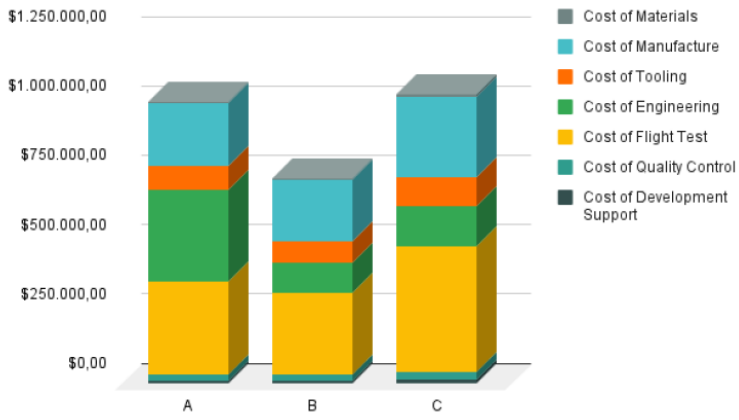


Figure 1 - Unit VPcost of scenario 1 in US$. Source: Ribeiro (2022)

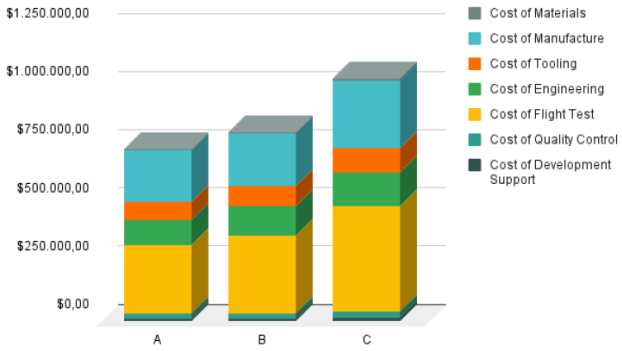


Figure 2 - Unit VPcost of scenario 2 in US$. Source: Ribeiro (2022)

6.2. - CASK model for three types of aircraft

Based on documentary data from generic models of a drone, an helicopter and a regional airplane (here identified respectively as D, H, and A) average power values were extracted. These values enabled the calculation of approximate battery expenses per hour, facilitating the estimation of total costs.

For take-off and landing, only the drone and helicopter models were taken into account, while for the cruise flight only the helicopter and the small airplane. This is due to the better performance approximation between them and the eVTOL.

The kWh for the drone were calculated from the mechanical power, which allowed to find the power value from the vertical effort needed to take off and land. The graph in figure 3 shows the differences in values between each of the phases.

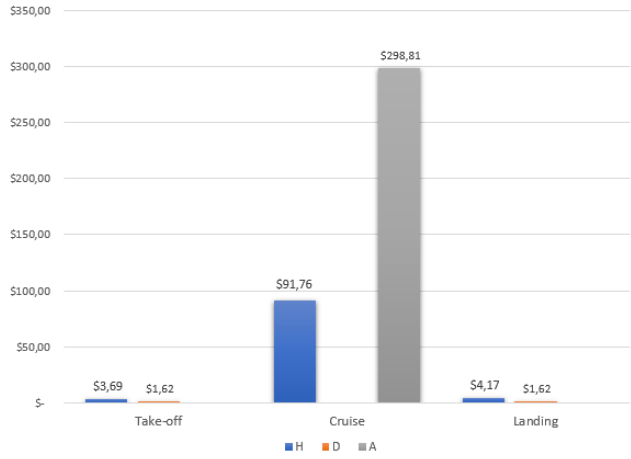


Figure 3 - Comparative cost chart by stages of operation in US$.

However, it is important to remember that the costs mentioned are only those related to maintenance and fuel, factors of paramount importance, but not unique. Based on these average values, it is possible to observe, as shown in figure 3, the average costs for each operational phase of the eVTOL, which is expected to operate similarly to the reference aircraft in their respective flight phases.

From these average values per step, it was possible to perform an average CASK calculation for the two manned aircraft including average maintenance values provided by α and β companies, for fixed and rotary wings, respectively, in order to increase the DOC values seeking a value closer to the real one.

$$CASK = \frac{DOC}{AvailableSeat * km} \tag{2}$$

Where:

$$DOC = Maintenance + Fuel \tag{3}$$

The CASK values based on maintenance and fuel in the comparison between the two aircraft can be found in the figure 4. To obtain a CASK value for an eVTOL, following the same parameters of the aircraft, information from the three models presented in this paper was used, where the drone was essential in helping to collect data for take-off and landing power for the calculation of energy costs.

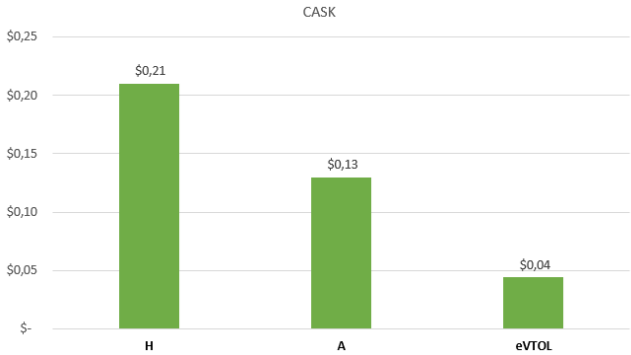


Figure 4 - CASK value for helicopter, airplane, and eVTOL based on fuel/battery and maintenance

As previously mentioned, fuel and maintenance costs alone represent a significant portion of expenses during operations. Nevertheless, as seen in Figure 4, the values are insufficient to provide a closer approximation to reality. Taking these aspects into account and based on documentation research on the aircraft in question, other common variables were calculated, including those already mentioned: maintenance and fuel, as well as the crew (pilot), airport fees, and engine overhaul.

From then on, the DOC value starts to incorporate the other mentioned variables, while taking into account the maximum range of each aircraft. As can be seen in Figure 5, fuel costs in fixed-wing and rotary-wing aircraft represent the majority of expenses throughout the journey, being the major contributors to

the increase in CASK. However, when it comes to the eVTOL, expenses are more evenly distributed, demonstrating cost-efficiency when dealing with an electric vehicle, mainly because the cost of recharging the batteries is significantly lower than that of aviation fuel per gallon.

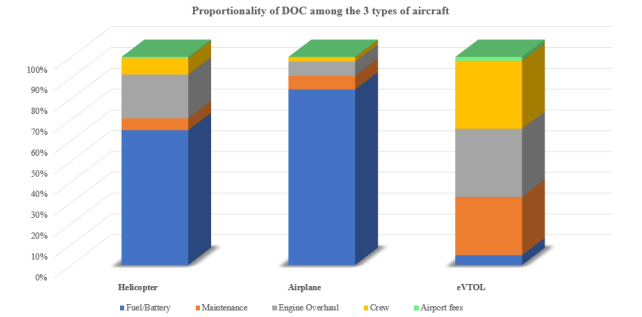


Figure 5 - Proportionality of DOC among the 3 types of aircraft

As can be seen in figure 5, the proportion of cost values for the small plane and the helicopter operate slightly higher than expected, due to the lack of information available on future operations involving eVTOL. For the sake of comparison, variables that can be found at the moment were used for the three aircraft, so factors that are also important for incorporating the DOC calculation were not taken into account and are still the subject of this study.

The calculation of CASK, now more refined, remains as equation 2, nevertheless, the values obtained become more realistic, as shown in equation 4. In the general case, the maximum ranges of each of the aircraft were considered, and as expected, the helicopter had a higher value, followed by the small airplane, and lastly, the eVTOL, as can be seen in figure 6.

$$DOC = F + M + E + P + T \tag{4}$$

Where:

- F = Fuel/Battery;
- M = Maintenance;
- E = Engine Overhaul;
- P = Pilot;
- T = Airport fees.

For this analysis, the entire flight range of the aircraft was taken into account, so that the greater the range, the lower the expected CASK value. It is noticeable that the eVTOL demonstrates greater cost-efficiency right from the beginning of the journey, even though its competitors have advantages in terms of range, as shown in table 1.

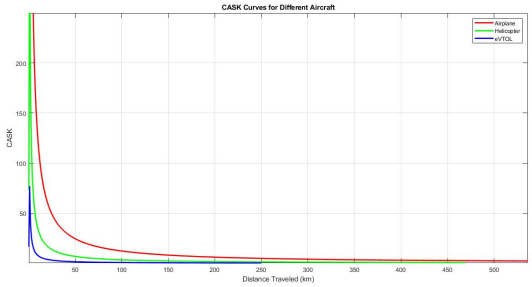


Figure 6 - CASK curves for different aircraft

Aircraft	Values
Helicopter	$ 0.73
Airplane	$ 0.62
eVTOL	$ 0.43

Table 1 - CASK Values

On the other hand, Figure 7 shows the points near the eVTOL's total range with the data for all aircraft manipulated to cover only this distance of 250 km. In this case, the eVTOL still maintains an advantage because the battery consumption is lower than the fuel costs of the others. In this analysis, the airplane, even though it carries a similar number of passengers to the eVTOL, exhibits less favorable performance, illustrating the fact that while it is currently the better choice for longer distances due to the limited capacity of existing batteries in the market, when its range decreases, the costs increase significantly, highlighting how much more cost-effective it would be to replace shorter routes with an eVTOL.

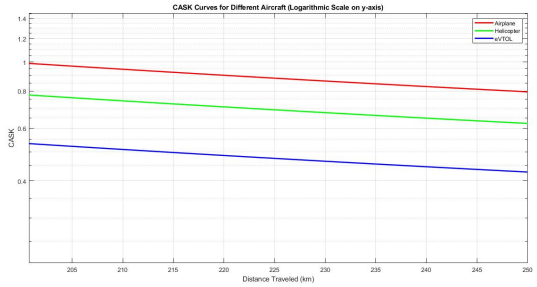


Figure 7 - CASK lines for aircraft at points close to the maximum eVTOL range

7. CONCLUSION

The eVTOL (Electric Vertical Take-Off and Landing Vehicle) has great potential to promote urban mobility, but significant additional studies and developments are needed for these aircraft to be put into operation competitively and safely. As expected, the unit cost of the aircraft tends to decrease as production increases, as demonstrated by the results presented.

In addition, it can be seen that the cost of energy is highest during the cruise phase in the proposed simulations, suggesting that this phase of flight should be the focus of model optimization.

Based on documentary data from air service provider agencies, values could be estimated for the different aircraft in order to propose a CASK curve, incorporating additional direct costs, in order to provide a more accurate estimate for comparisons and improve profitability in airline operations. However, this is an estimate that may change depending on information such as the value of kWh, fuel, airport taxes, which tend to be different depending on the location, as well as the change in values for each eVTOL model, since they have different systems and it is not yet clear which variables will influence their operations.

As illustrated in figure 3, it is possible to see a significant reduction in the costs estimated in simplified form for the CASK of an eVTOL, based on just two Direct Operating Cost parameters, maintenance and fuel. These results suggest that the value of the CASK curve for the eVTOL is likely to be lower compared to other aircraft used in Urban Air Mobility (UAM), indicating that the eVTOL will operate at lower costs compared to currently existing alternatives.

Figure 5 illustrates how the transition to electric propulsion aircraft can dramatically reduce operating costs. However, there is still the barrier of current batteries which, in addition to being large in size, do not have a high capacity. However, for relatively short distances, as is the case in UAM, the eVTOL can become a significant ally in terms of economy and reducing pollution emitted by transportation means. The proposed CASK curves reinforce this idea and encourage the development of electric systems to enhance urban mobility.

References

Bauranov, A. & Rakas, J. (2021). Designing airspace for urban air mobility: A review of concepts and approaches., ELSEVIER.

Cizreliogullari, M. N., Barut, P. & Imanov, T. (2022). Future air transportation ramification: Urban air mobility (uam) concept, The Boeing Company. AIAA.

Doo, J. T., Pavel, M. D., Didey, A. & et al. (2021). Nasa electric vertical takeoff and landing (evtol) aircraft technology for public services â a white paper, NASA.

Fredericks, W. J., Moore, M. D., Busan, R. D. & et al (2013). Benefits of hybrid-electric propulsion to achieve 4x increase in cruise efficiency for a vtol aircraft, AIAA Aviation.

Mihara, Y., Pawnlanda, P., Nakamoto, A. & et al. (2021). Cost analysis of evtol configuration design for an air ambulance system in japan, CESUN.

Moore, M. D. & Fredericks, B. (2014). Misconceptions of eletric propulsion aircraft and their emergent aviation markets, AIAA SciTech.

NASA (2021). Pem fuel cell model for conceptual design of hydrogen evtol aircraft, NASA.

NASA (2022). UAM overview, NASA.

Rath, D., Rosenbrock, R. C., Potochnik, G. & et al. (2010). Guide for the presentation of helicopter operating cost estimates, Helicopter Association International.

Ribeiro, B. L. J. (2022). Technical economic approach in the multidisciplinary optimization of evtol-type aircraft., UnB.

Teodorovic, D. & Janic, M. (2017). Transportation engineering. theory, practice and modeling. pp. 719–858.

Ugwueze, O., Statheros, T., Bromfield, M. A. & et al. (2023). Trends in evtol aircraft development: The concepts, enablers and challenges, ELSEVIER.

Yang, H. & Lee, H. (2023). Smart city and remote services: The case of south koreaâs national pilot smart cities, Telemat. Inf. 79(C).
URL: *https://doi.org/10.1016/j.tele.2023.101957*

PREVISÃO DA OCORRÊNCIA DE ATRASOS EM DECOLAGENS DO AEROPORTO DE GUARULHOS

Hélio da Silva Queiroz Júnior*[1], Viviane Adriano Falcão[1], Francisco Gildemir Ferreira da Silva[2]
[1]Universidade Federal de Pernambuco, [2]Universidade Federal do Ceará

*** Corresponding author e-mail address**: helio.junior@ufpe.br

PAPER ID: SIT2312

ABSTRACT

Flight delays in commercial aviation have become a common problem worldwide due to increasing air transportation demands, resulting in higher costs and continuous adjustments in flight management. Efficiently predicting these delays is a recurring research topic in air traffic operations. Machine learning has emerged as a robust alternative to classical statistical methods, particularly Artificial Neural Networks (ANNs), known for their modular adaptability. However, varying study scenarios yield different accuracy outcomes. This study aims to define an appropriate prediction and classification scenario for regular departures at an airport, considering influencing variables, acceptable accuracy levels, and the most effective prediction model. It proposes a class-based predictive system applicable to São Paulo International Airport (SBGR) and the national airline Gol Linhas Aéreas (GLO). Bibliometric review and meta-analysis were employed to establish a baseline reference for method accuracy evaluation. Furthermore, studies were categorized using Data Envelopment Analysis by metafrontier to identify ideal prediction scenarios. The analyses reveal that the MultiLayer Perceptron (MLP) Neural Network demonstrates better predictive efficacy for route or airline-specific analyses, irrespective of delay reasons. A comparative case study was conducted for the defined prediction scenario, confirming that classifying delay time yielded the highest accuracy regardless of delay reasons. It was found that the specificity of scenarios and delay reasons within the chosen analysis area had a stronger relationship with predictive accuracy than the volume of data obtained.

Keywords: Flight delays, Artificial Neural Networks, Prediction, Classification, Air transportation.

ACKNOWLEGDEMENTS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

1. INTRODUCTION

According to EUROCONTROL's annual report in 2019, 24.2% of flights in Europe experience delays. In the United States, the cost per minute of delay for American airlines was estimated to be $68.48 in 2017 (A4A, 2017).

In Brazil, approximately half of all flights were delayed in 2019, as reported by the National Civil Aviation Agency (ANAC, 2019). ANAC provides data on flight delays and cancellations, showing that Brazil has an average annual delay rate of 6.97% for delays exceeding thirty minutes and 2.49% for delays exceeding one hour across approximately fifty-four scheduled flight legs. This corresponds to around 10 out of every 100 flights experiencing delays over thirty minutes (ANAC, 2021). It is estimated that each flight with a delay of over thirty minutes incurs a loss of approximately U$2,05 for Airlines.

São Paulo International Airport (SBGR), which has the highest passenger and cargo traffic in Brazil, experiences an average monthly delay rate of 14% for both arrivals and departures (ANAC, 2022). The availability of new and accessible technologies has facilitated data acquisition, enabling the application of aviation studies in critical areas such as big data analysis, air transport network management, and machine learning-based flight delay prediction (CHU et al., 2020).

To address these challenges, this study focuses on proposing a classification-based predictive system tailored to SBGR and the national airline Gol Linhas Aéreas (GLO). The objective is to implement a predictive system that accurately forecasts delays and aligns with the operational reality of the airport and airline, allowing for better planning and decision-making.

2. MAIN CAUSES OF FLIGHT DELAYS

Understanding the current air market situation is crucial to characterize the cause of delays at an airport, including capacity in relation to existing traffic, expected demand growth, and potential consequences such as increased flight delays. Chen et al. (2021) emphasized the incorporation of specific airport functionality information and other key factors like queue and en-route delays, once available.

Schultz & Reitmann (2019) highlighted ground operations as a significant contributor to delays, as uncertainties during the airborne phase had a lower impact compared to ground operations deviations. Flight operations planning favors certain delay conditions depending on the flight type. International flights, with their additional requirements and potential complexities in-ground and en-route operations, pose particular challenges (KHAN et al., 2021). Additionally, weather and seasonal conditions can disrupt scheduled departures at airports.

For Chinese airports, Chen et al. (2021) recommended considering either the current weather or then weather conditions in the preceding two hours. Holidays and peak demand periods should also be considered due to observed variations in aircraft and passenger movements (CHEN et al., 2021). Beijing International Airport (ZZBA) has conducted delay studies utilizing real-time data collection and macro variables, including weather, seasonal effects, delay propagation, and air traffic control (Yu et al., 2019).

Prediction studies highlight the need for diverse information to account for the various classifiable reasons for flight delays. To address this, the International Air Transport Association (IATA) has categorized the main causes of aircraft delays into eight major categories, facilitating communication of delay reasons and related messages (IATA, 2016).

For Brazil, ANAC (National Civil Aviation Agency) uses the same classification for delays as described by IATA, with codes assigned to each justification identified after the occurrence of the delay. Then, these codes are distributed among reasons related to passengers and baggage, technical and aeronautical equipment, or even weather conditions (Table 1).

Table 1: Codes to be used in aircraft movement and deviation messages. Source: Adapted from IATA (2016), ANAC (2000).

IATA Group	Justifications	IATA/ANAC Codes	Source
1. Passenger and Baggage (Cargo and Mail)	Airport facilities - support restrictions	AF	IATA AHM-730
	Migration/customs/health	AG	IATA AHM-730
	Security/pax/cargo/alarm	AS	IATA AHM-730
	Release of air traffic services/anticipation	AT	IATA AHM-730
2. Aircraft Handling and Ramps	Fueling/defueling	GF	IATA AHM-730
3. Technical and Aeronautical Equipment	Aircraft replacement	TC	IATA AHM-730
	Aircraft defects	TD	IATA AHM-730
4. Aircraft Damage or Automated Equipment	Failure Damage during flight operations	DF	IATA AHM-730
	Damage during ground operations	DG	IATA AHM-730
	Failure of automotive and passenger service equipment	MA	AIC1504 A
5. Flight Operations and Crew	Authorized	AO	IATA AHM-730
	Flight plan - approval	FP	IATA AHM-730
6. Weather	Alternative below limits	WA	AIC1504 A
	Deicing and removal of snow and/or mud on aircraft	WI	IATA AHM-730
	Origin airport below limits	WO	IATA AHM-730
	Delay due to return - weather conditions	WR	IATA AHM-730
	Removal of ice/water/mud/sand at airport	WS	IATA AHM-730
	Delay at alternative airport - weather conditions	AM	IATA AHM-730
	Destination airport below limits	WT	IATA AHM-730
7. Air Traffic Flow Restriction and Government Authorities	Origin airport closed	AI	AIC1504 A
	Destination airport closed	AJ	AIC1504 A
	Airport with operational restrictions	AR	AIC1504 A
8. Reactive and Miscellaneous	Non-specific delays, others	MX	IATA AHM-730
	Aircraft connection	RA	IATA AHM-730
	Aircraft connection/return - outbound flight not penalized airport closed	RI	AIC1504 A
	Aircraft connection/return - outbound flight not penalized weather conditions	RM	AIC1504 A

2.1. Predictability and Flight Information

According to Khan et al. (2021), flight plans are meticulously prepared before each flight, detailing various operational parameters essential for the aircraft's smooth operation. For international flights, airlines develop the flight plan four hours in advance. These plans enable controllers to monitor the projected flight stages and assess the deviations in estimated time across different functional departments, including weather conditions, air traffic flow, aircraft performance, and other factors crucial for determining the optimal flight trajectory and ensuring safe operations.

In addition to the intricate nature of the required procedures, the overall air demand at analyzed airports significantly impacts flight punctuality. Yu et al. (2019) highlighted one of the challenges in delay analysis, which is the vast amount of information collected from flight plans at both macro and micro levels. This abundance of data can impede the system's ability to predict delays accurately or introduce collinearity issues among redundant factors. Consequently, the lack of generalizability presents a second challenge, as a large dataset often contains redundant information.

It is crucial to understand the current situation of the analyzed area, such as airports, airlines, or routes, in terms of existing capacity and expected demand growth to characterize the effects of delays at an airport. Apart from the previously mentioned factors related to airflow and control, more specific and time-specific factors like queue delays, en-route delays, holidays, and peak demand periods are considered whenever data is available (CHEN et al., 2021).

In light of these considerations, Khan et al. (2021) emphasized the need for developing a predictive system that accurately anticipates delays, surpassing the mere indication of their occurrence or ambiguities in categorization. This viewpoint aligns with Truong's (2021) perspective, which underscores the importance of analyzing the relationship between selected input variables for delay prediction systems and their current occurrence. Many current studies focus on employing various machine learning methods or their combinations to predict delays, but they often lack in-depth exploration of the data or consideration of real-world applicability of the models in establishing a correlation between input variables and delays.

Thus, the complexity of defining flight delay prediction models entails selecting influential variables, possessing prior knowledge of the required data, choosing the appropriate prediction model, and ensuring a significant accuracy margin in correlating causes and effects.

2.2. Variables that influence flight delays

Several studies were reviewed to identify commonly applied scenarios in predictions, allowing a comparison between methods, their accuracy, and the variables used.

Each scenario, set of variables, and selected models aimed to identify and describe distinct reasons for delays, whether due to crew and cabin boarding (WEI & VAZEA (2018), SCHULTZ & REITMANN (2019)) severe or unexpected weather impacts (CHEN & WANG (2019), LIU et al. (2019) and OLIVEIRA et al. (2021)) related to cargo deliveries and boarding (LIU et al. (2019)b); due to airline misconduct (ARORA & MATHUR (2020)); capacity issues on congested airport days (SCARPEL & PELICIONI (2018)); or even models that encompass the universality of reasons (LAMBELHO et al. (2020), KHAN et al. (2021), YU et al. (2019), CHEN & LIN (2021), TRUONG (2021)).

In the analyzed works, machine learning models stood out as the majority compared to classical forecasting methods, such as logit regression, panel regression, and multinomial logistics used by Oliveira et al. (2021), Chen & Lin (2021), and Arora & Mathur (2020), respectively.

This situation aligns with the findings presented by Karlaftis & Vlahogianni (2011) when comparing statistical data analysis and the use of artificial intelligence, specifically neural networks, for transportation research. They emphasized that, despite the similarities, when the emphasis of information processing is on obtaining accurate predictions, machine learning is suggested as the most suitable method.

This principle is consistent with the findings of Chen et al. (2021), who defined linear regression as an effective and applicable forecasting method due to the smaller size of the database used.

3. MACHINE LEARNING METHODS

Simon (1983) defined machine learning as improving a system's performance when it repeats the same task or another task from the same population. Regarding the prediction of flight delays, supervised data generalization models are commonly used due to the complexity involved in analyzing unsupervised learning responses. Khan et al. (2021) highlighted two commonly applied estimation mechanisms in supervised learning: regression and classification. Regression predicts flight delay as a continuous output, such as expected delay time or delay groups, while classification categorizes flight delays into binary form (1 = delayed flight, 0 = on-time flight).

Truong (2021) emphasized the necessity of a supervised causal network structure for prediction purposes. When analyzing risk prediction as the target variable, the network structure can be used to predict the risk (probability of an incident) based on other variables (predictors) in the network. If the risk is a discrete variable, the prediction model becomes a classification model, and the target variable is referred to as a classifier.

Considering the uncertainty inherent in-flight delay data, Khan et al. (2021) argued against assuming normality in regression and class balance in classification. Pre-processing and transformation techniques aimed at improving the distribution of highly skewed and scattered data offer limited benefits for regression models. However, the application of various sampling techniques improves classifier performance by balancing the classes and smoothing decision boundaries.

Therefore, when conducting analyses involving diverse categories, it is essential to implement data sampling adjustment mechanisms. Among the sampling techniques addressing class imbalance and overlapping decision boundaries, Khan et al. (2021) identified the Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) as the most effective approach for flight delay prediction studies. This technique oversamples the minority class. Subsequently, it removes the noisy majority class, borderline majority, and minority classes using under-sampling and data cleaning methods like TOMEK, resulting in smoother decision boundaries.

As a result, the most effective method for flight delay prediction using machine learning should achieve high accuracy values defined by the F1-Score and demonstrate robust performance when exposed to sampling techniques for large datasets. Such a method's capability would enable its practical application in real-world scenarios, benefiting air traffic control and management in airports or airlines.

3.1. Artificial Neural Networks (ANNs) applied in flight delay prediction studies

Artificial Neural Networks (ANNs), in their various form, have been gaining prominence in more complex data analyses among the set of artificial intelligence methods classified as machine learning. ANNs are defined as parallel and distributed systems composed of interconnected simple processing units called artificial neurons. They can store information, recognize and classify patterns, and make predictions (MARCY, 2017). As characteristics of supervised prediction models, the generalization ability of a neural network comes from training. During training, known input values and their corresponding expected outputs are fed into the network to calibrate the network and the weights assigned to each interaction, aiming to obtain responses that are closest to the initially known value θ.

However, searching for an ideal set of weights, which can make an ANN generalizable, involves distinct processes. One of these processes is called the backpropagation algorithm, which, according to Haykin (2001), determines the network's learning behavior. Back propagation aims to reduce the error between the threshold and the predicted value in two stages during training. Some studies implement ANNs with the multilayer perceptron configuration using backpropagation, like Khan et al. (2021), who predicted flight delays and departure duration, achieving an average prediction accuracy of 65.5%, 61.5%, and 59% for classifying delay status and predicting delay duration within 60 min and 30 min limits, respectively.

The system proposed by Yu et al. (2019) using deep learning neural networks, which are robust learning models due to their ability to handle large datasets, demonstrated high capability in dealing with the challenges posed by large datasets and can capture key factors influencing delays. New influential factors are identified, in addition to the commonly employed ones such as previous flight delays, number of passengers per flight, air traffic control, and so forth, including the route situation and airport congestion level (based on the number of flights and passenger flows).

Another study utilizing ANNs was conducted by Truong (2021), who proposes the use of the USELEI neural network methodology, corresponding to the steps of understanding (U), sampling (S), exploration (E), learning (L), evaluation (E), and inference (I), to predict the risk of delay and non-delay cases in the U.S. National Airspace System (NAS). The study achieved positive and negative predictive values of 91.56% and 95.45%, respectively.

Therefore, applying ANNs to predict the occurrence of delays is a reality in various scenarios. The considerable volume of data and the multitude of possible reasons for delay classification require models with higher computational capacity and generalization of responses.

2. METHODOLOGY

A case study was conducted to compare the efficiency of flight delay prediction in the operation of a Brazilian airport and an airline based on a proposed prediction scenario. This comparison aims to indicate the predictive capacity of the identified scenario, serving as a baseline parameter for an approximation of the current analysis of traffic and control used in Brazil.

The model accuracy derives from the machine learning method known as Artificial Neural Networks (ANNs), with the obtained responses evaluated for the two specified analysis areas (universal delay prediction for an airport and an airline). In both situations, the output of the ANN was the categorization of the occurrence of a possible delay, including the type of delay or the expected delay time interval for the flight.

Thus, the methodology applied in the study is divided into six execution stages, in addition to an initial stage of delimiting the analyzed areas, described as follows.

3.1.1. Preliminary Stage (Stage 0): Definition of the analysis áreas.

The dimensions of the analyzed areas in the case study indicate the predictive capacity of the model applied to the airport and the airline, distinguishing the level of competence of the operational flight logic applied by each entity in the occurrence of delays.

Despite the movements and the size presented for Guarulhos-SP Airport, in Chapter 5, the justification for applying the scenario definition responses in a Brazilian case leads to the verification of the most prominent national airlines operating at SBGR and the annual delay rate. Among the airlines operating at SBGR in 2019, three national airlines are listed with the highest number of passengers and aircraft movements: Latam (TAM), Gol (GLO), and Azul (AZU).

Thus, analyses of delay occurrences were conducted for these three national airlines operating at SBGR (TAM, GLO, and AZU), selecting the company with the highest occuring delays exceeding 15 minutes. The collected data are from regular departures at SBGR for domestic and international aviation, regardless of whether they were passenger or cargo flights in the year 2019.

1st Stage: Definition of the prediction logic

According to the conducted theoretical review, the multilayer perceptron method known as Artificial Neural Networks (ANNs) with the backpropagation algorithm was chosen for the prediction task.

The types of classes assigned to delays will be two-fold, with the desired output of the network being the classification of possible flight delays at SBGR. The first logic employed will classify delays based on the IATA/ANAC groups of possible causes for these delays.

Thus, the predicted output of the ANN for the first logic corresponds to an integer corresponding to the numbers assigned to each group. However, it was necessary to include a tenth group with an output of 10, representing non-delayed flights, to account for these cases when flights depart on the previously scheduled time.

However, although a regression analysis by group pf delays is applied to a forecast situation for only one airport and one airline, the greater range of cases may result in a more comlex definition of delay due to different causes.

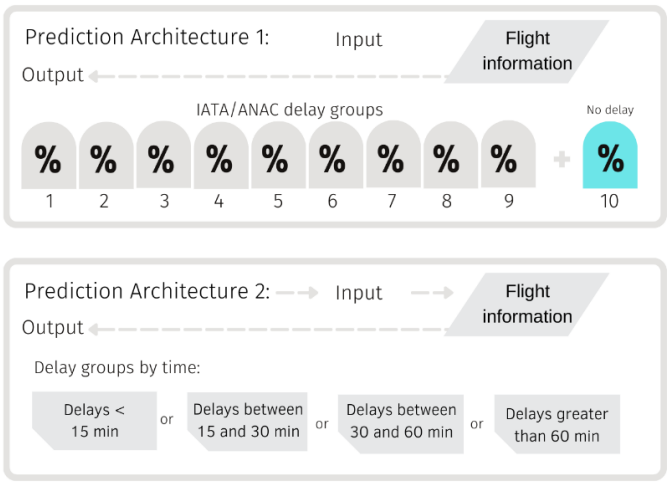
Therefore, a second prediction logic with a single dimension of classification (in this case, time) was necessary. Thus, the expected response by the network in this second logic was the time interval in which the delay falls. The classification using time intervals by Khan et al. was employed (2021) as part of the so-called "hierarchical analysis" proposed in their study. In this classification, the authors partitioned the database so that the flight prediction occurred according to the universe that favored its accuracy the most.

In this case, the predictive system of delays groups them according to their interval, which can be delays up to 15 minutes from the scheduled time (interval 1), between 15 and 30 minutes (interval 2), between 30 and 60 minutes (interval 3), or delays over 60 minutes (interval 4).

Thus, the logical prediction models can be summarized according to Figure 1.

.

Figure 1: Organization of the prediction logics applied in the study.



3.1.2. 2nd Stage: Selection of variables for the model

The first issue encountered when defining the explanatory variables in a forecasting model is the availability of compatible data before takeoff. In a way, the values predicted for operations, weather, load, and expected flight passengers, are used. Using data already predicted adds more uncertainties to the model. However, the information that will feed the system must be capable of approximating the estimated responses to the daily reality of operations, whether they come from the traffic operator, the airline, or the airport itself, while ensuring the effectiveness of the proposed model.

Thus, based on the groups of influential variables already used in studies of delay prediction in commercial flights, the explanatory variables were selected for the network-defined output.

Data from reports, studies, and information on the Brazilian air market conditions made available by ANAC were collected. The historical series of statistical data on air transportation in Brazil, with a high degree of detail, allowed for capturing information for each flight performed at the analyzed airport.

A database of aerial meteorological information from Iowa State University in the United States was collected from the Iowa Environmental Mesonet to complement the data set required for categorizing delays by local weather conditions, regular meteorological reports (METeorological Aerodrome Report - METAR) for SBGR (São Paulo-Guarulhos International Airport)

Therefore, the set of available and calculated variables that will compose the study is presented in Table 3, along with the description and type of each applied variable.

3.1.3. 3rd Stage: Construction of the database

After collecting data regarding the set of selected variables for the prediction model, Table x, it was necessary to verify the occurrences of delays throughout the year 2019.

Thus, the data were processed every month, aiming to establish a relationship between the verified delay occurrences, the IATA/ANAC delay class, and the observed time interval for the delay from the perspective of SBGR (São Paulo-Guarulhos International Airport) and the selected airline, GLO.

.

Table 3: Set of variables applied in the forecasting study.

Group	Author	Variable description	Unity	Source
Flight Plan	Lambelho et al. (2018); Schultz & Reitman (2019);	Estimated departure month	-	ANAC Microdata
		Estimated departure day	-	
		Estimated departure hour	-	
		Estimated departure minutes	-	
		Estimated arrival month	-	

	Khan et al. (2021); Yua et al. (2019); Arora & Mathur (2020); Truong (2021)	Estimated arrival day	-	
		Estimated arrival hour	-	
		Estimated arrival minutes	-	
		Day of the week the flight occurred	-	
		Distance to be flown	Km	
		Airline responsible for the flight	-	
		Number of seats offered for the flight	-	
Air Traffic	Yua et al. (2019); Chen et al. (2021); Liu et al. (2019); Chen & Lin (2021); Truong (2021)	Simultaneous takeoffs predicted to occur in the whole hour interval in which the flight is scheduled to depart	-	
		Simultaneous landings predicted to occur in the whole hour interval in which the flight is scheduled to depart	-	
Flight Operations	Chen et al. (2021); Liu et al. (2019); Yua et al. (2019); Truong (2021)	Aircraft model payload to be used in the flight	Kg	
		Estimated maximum takeoff weight	Kg	
		Average operating speed of the flight	Km/s	
		Estimated flight duration	-	
Meteorological	Chen & Wang (2019); Liu et al. (2019); Oliveira et al. (2021)	Air temperature at the time of the flight, measured at 2 meters above the ground (°F)	F	Iowa State University: Iowa Environmental Mesonet - Iowa State University
		Wind Chill or Heat Index in Fahrenheit	F	
		Relative humidity at the time of the flight	%	
		Wind direction in degrees relative to true north	º	
		Wind speed	Knots	
		Atmospheric pressure	Inches	
		Visibility at the time of the flight	Miles	

However, for calculating the delay time, ANAC (National Civil Aviation Agency) provides data obtained from the history of active regular flights - VRA, including the estimated time for takeoffs at SBGR and the IATA/ANAC delay class. On the other hand, the historical series of flights provided by the airline contain the actual departure times for each flight. Similar to the case of meteorological data, which requires a connection with the historical series of flights through the date and time of flight execution.

Therefore, the database construction resulted from the combination of information contained in the three original datasets collected, with the similarity between them applied as the key factor for data integration.

3.1.4. 4th Stage: Data preprocessing

At this stage, the database previously formed was preprocessed by removing null values (N/A) and outliers identified in the variables and arranging them in a matrix format, ensuring greater efficiency in data computation.

The outliers were defined following the rules set by Yu et al. (2019), where data entries with extreme delay values at the top and bottom, 1% are considered outliers, thus being eliminated from the dataset. The remaining 98% of instances were directly used for analysis.

As required by the selected method, in supervised training for neural networks, the data needs to be separated into training and testing sets. For this, the proportion used by Chen et al. (2021) was replicated, where 80% of the data is allocated for the network's training phase and 20% for testing.

However, due to the high dispersion of the data resulting from the size of the formed database, it became evident the need for redistributing the classes for the first and second prediction logics.

Therefore, the SMOTE-TOMEK balancing method was applied to the formed

database to distribute the IATA/ANAC delay classes, which balances the first logic, and for the delay interval classes, which balances the second logic.

3.1.5. 5th Stage: Training and definition of architectures

After preprocessing the formed database, the training stage of the network is responsible for generalizing known results so that the causal factors approximate the expected output responses.

For this purpose, the architectures applied to the neural networks should be capable of expressing the highest accuracy in prediction, considering the following factors: the number of hidden layers, the number of neurons per layer, activation functions applied, and the programming algorithm. These factors should mathematically replicate the behavior of the data.

Thus, for this research, network architectures were defined based on the selected analysis areas, as shown in Table 4. The training was then performed for each architecture, assuming a maximum of 500 epochs for each training.

Table 4: Architectures applied in the training of the neural networks.

AREA	ANN ARCHITECTURE			
	Name	Layers	Neurons per layer	Activation Function
A (Airport - SBGR)	RNA - A1	3	20	Hyperbolic tangent sigmoid
A (Airport - SBGR)	RNA - A2	3	20	Log-sigmoid
B (Airline - GLO)	RNA - B1	3	20	Hyperbolic tangent sigmoid
B (Airline - GLO)	RNA - B2	3	20	Log-sigmoid Log-sigmoid

3.1.6. 6th Stage: Output testing and analysis of results

After training the network, the final stage of neural network modeling is testing the system with data not used in the training phase. This stage is responsible for evaluating the predictive capability of the created neural network based on the constructed architectures.

The network's accuracy results are measured using the F1-Score. For the first logic, correct predictions of delay groups (groups 1 to 9) are considered true positives (TP), while correct predictions for group 10 are considered true negatives (TN).

In the second logic, all delays with less than 15 minutes are classified as non-delays due to the small delay duration and ANAC's considerations in classifying a flight delay only for cases exceeding this time.

The neural networks were developed using the Python programming language, with the assistance of the PyCharm algorithm development environment. The languages used were Numpy for numerical data processing and TensorFlow for building the architectures and testing the networks.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Based on the defined methodology, the results are presented according to the planned steps.

4.1. *Preliminary Step 0 and 1st Step: Definition of analysis areas and prediction logic determination*

In the preliminary step, the aim was to select one of the active Brazilian airlines at the airport to apply the analysis scenario. According to data provided by ANAC (2022), for the year with the highest number of passenger and aircraft movements at SBGR, 2019, the three main airlines, Azul, Latam, and Gol, accounted for over 35,000 delayed flights. Of these, 50.22% were TAM, 37.73% were GLO, and 12.05% were AZU.

However, despite TAM having the highest percentage of delays in 2019, it recorded a lower total number of flights with delays exceeding 15 minutes compared to GLO, as shown in Table 5.

.

Table 5: Occurrence of flight delays by airline at SBGR, year 2019.

Airline Code (ANAC)	*ICAO Code*	*On-time*	*Delay Group 1*	*Delay Group 2*	*Delay Group 3*	*Delay Group 4*
1000909	AZU	64,07%	17,04%	9,17%	6,62%	3,09%
1001093	TAM	59,11%	28,72%	6,18%	3,60%	2,39%
1000854	**GLO**	**47,49%**	**30,02%**	**10,57%**	**7,64%**	**4,29%**

Source: Adapted from ANAC (2022).

In the classification of delays observed in 2019 for GLO at SBGR, the predominant IATA/ANAC groups are related to logistical and fleet issues of the airline. Cases related to miscellaneous and reactive delays, group 8, specify situations with unclear reasons for the delay but also issues with flight connections and management. Group 4 refers to aircraft damage on the ground or during the flight that leads to the occurring delays.

Therefore, in addition to SBGR, the magnitude and consequences of the delays make GLO the selected airline for analysis.

4.2. *2nd and 3rd Stages: Selection of variables for the model and Formation of the database*

With the formed database, the statistical distribution of departure information at SBGR demonstrates that simultaneous movements during takeoff can indicate a capacity problem as a cause of delays.

The relationship between capacity and departure delays at Guarulhos can be observed by correlating the recorded delay times in the database with the expected number of simultaneous flights at the time of occurrence.

Therefore, due to the longer operation time, the higher the number of simultaneous departures (Figure 4 a), the expected trend is an increase in the observed delay time. The opposite occurs when comparing landings (Figure 4 b), in which the trend is decreasing.

Despite the predominance of unexplained occurrences in Group 9, the causes described as connection issues, passenger and baggage problems, and mechanical issues with aircraft indicate that the hypothesis of airport capacity failures for aircraft movement may not be significant based on the distribution into delay groups

As a result of predominant domestic operations, the use of aircraft with lower seating capacity is observed in the data. However, the fleet appears as one of the groups with the highest delays recorded for GLO in SBGR.

4.3. *3rd and 4th Steps: Database Formation and Data Preprocessing*

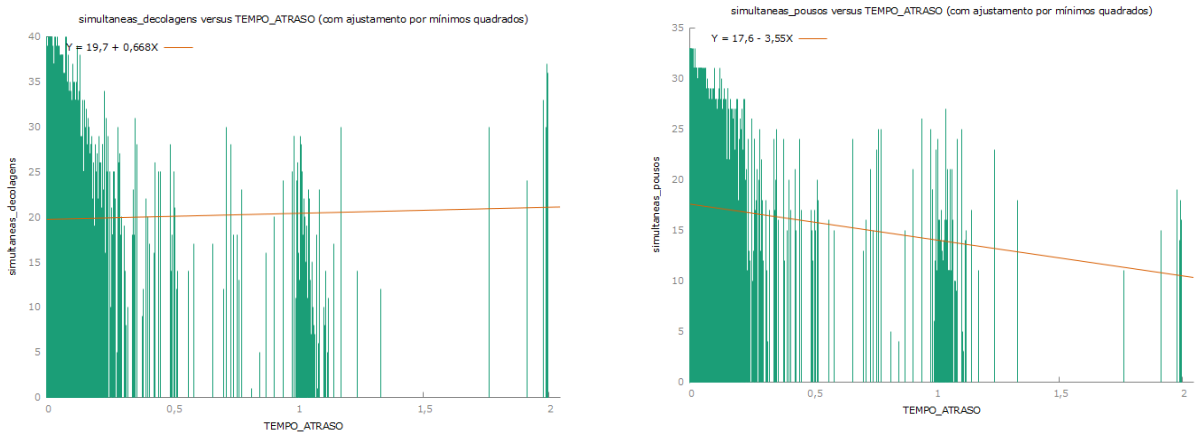
The database formed by the set of selected descriptive variables along the defined outputs for the prediction logics in constructed classes initially consisted of 189,547 flights. Through the preprocessing process involving the outlier's elimination, as Yu et al. (2019), there was a reduction in the number of instances in the final database to 94,381 departures.

After removing the outliers, the data maintained the distribution relationship between classes observed for SBGR. Thus, a problematic issue raised by Khan et al. (2021) became evident; the generalizability of the predictions for class-based studies being influenced by the balanced distribution of possible outputs.

In this regard, the database distribution highlights a predominance of lower magnitude delays, equal to or less than 15 minutes. Therefore, the mixed balancing method SMOTE-TOMEK, indicated as the most suitable in-flight delay prediction studies by Khan et al. (2021), was applied.

As a result, the balancing process assigned an equal number of instances to each class so that the predominant delay class ($\leq$ 15 minutes) had a reduction in the departure numbers for the second programming logic. However, the other classes had virtual value gains to compensate for the preliminary outcome.

Figure 4: Relationship between recorded delay time and simultaneous takeoffs, a), and recorded simultaneous landings within the hour interval, b).



a) b)

Table 6: Division of instances for training and testing.

Area of Analysis	***Prediction Logic***	***Instances Used***	
		Training (80%)	***Testing (20%)***
A (Airport - SBGR)	1st (IATA/ANAC Groups)	396192	99048
	2nd (Delay Interval)	233790	58448
B (Airline - GLO)	1st (IATA/ANAC Groups)	63981	15995
	2nd (Delay Interval)	63919	15980

Predicting logic based on the delay classes according to the IATA/ANAC groups requires balancing as the goal of the analysis at an airport, where it is possible to differentiate delays based on their possible causes.

Therefore, the result for this group shows considerable balancing with the generation of virtual instances for the less frequent classes The on-time departure group (no delay), group 10, is the only one that experiences a reduction in the number of instances.

Classifying on-time departures equally to the delay groups can enable the network to attribute the cause in flight analysis correctly. Still, it may introduce a false positive bias for delays, considering the common proportion between delays and on-time flights.

Therefore, the balanced databases for each prediction logic were applied to Artificial Neural Network models, with the datasets divided into training and testing sets according to the previously defined proportions. Thus, the set of instances used for training and testing in both analysis areas is presented in Table 6.

4.4. *5th and 6th Steps: Training and architecture definition, Testing the output and analysis of results*

The networks were modeled in Python using the PyCharm development environment. The dataset, divided into test and train sets, was applied to the defined architectures, allowing the observation of training responses.

Next, the test results were categorized based on correctness and error considerations to form the correlation matrix. Thus, the summary of results for training and testing, according to the analyzed areas and logic, is presented in Table 7.

Among the tested architectures, the activation function that best describes the relationships between the selected variables and the occurrence of delays is the hyperbolic tangent sigmoid (TANSIG) function. The numerical variation provided by the sigmoid function allows the system to assign more response classes to the network due to the positive and negative amplitude of the function.

Since the proposed model assigns four to ten distinct classes, the larger the numerical range allowed by the generated wave's amplitude, the greater the possibility of distinction between classes.

This hypothesis is supported by comparing it with the responses of the log-sigmoid model, which has a negatively limited amplitude range. The tests showed not only a lower accuracy, according to the calculated F1-Score in a specific analysis of the results but also indicated biases for the delay groups in both logics.

Another point to consider is the division of prediction logics. As indicated in the first part, more specific analysis groups can achieve higher accuracy in the system's response.

When both airport and airline areas are analyzed, the results indicated two opposite situations for each logic. The first logic is based on grouping flights into delay categories. This division, besides having the largest number of groups, incorporates specific variables and occurrence conditions for each situation. In summary, it can be concluded that the first prediction logic has a variety of units considered for each possibility of delay.

On the other hand, the second prediction logic uses only one unit to classify the system inputs, which is the delay time. Combined with a smaller number of possible response groups, four instead of ten, the results in Table L demonstrate the higher predictive capability of the model according to this logic.

However, even though the second prediction logic proves to be more suitable due to the observed accuracy in the tests, the area of analysis with the highest accuracy is the airport analysis, not the airline analysis, as indicated by the results in the first part.

This result supports the proposition made in the first part when defining the ideal prediction scenario, as characterizing the scenario in terms of the studied area is more related to the availability and capacity of the obtained data to describe the phenomenon, in this case, the delay in a specific flight rather than the sample size or the investigation region.

However, the set of variables selected provides more information about the airport than the specific airline. The gap in terms of variable specificity is a result of the lack of availability of information about the operations carried out at SBGR or by GLO. The use of data from ANAC or the University of Iowa provides a macro view of each flight. Moreover, with a difference of only 4% in accuracy, it can be said that the models are statistically nearly tied.

Specifically for accuracy, both prediction logics in classes do not reach the acceptable accuracy defined by the meta-analysis. With a maximum of 44.46% accuracy according to the F1-Score, the regression-type analysis is still below the minimum of 77.22% determined in the first part.

When trying to find a predictive system applicable to the operational reality experienced in an airport and an airline, the variables that were known in advance and made available for study were the main limitations observed.

In comparison to the specificity of the assumed variables, for example, Wei & Vazea (2018) used the times verified for each crew boarding stage in an airline, while Scarpel & Pelicioni (2018) used the estimated times for each flight operation and the airport's capacity at the time of takeoff.

Thus, a hypothesis still relies on the definitions made in the first part, that the specificity of the data has a greater influence on the response than the sample size.

The distribution of results in the confusion matrices also shows that, for the first prediction logic, the predominance of false negatives (delayed flights classified as non-delayed) occurs due to the balance between the adopted classification groups. In general, the class distribution ends up prioritizing the delays when nine delay groups are defined, while there is only one group for non-delay cases.

Table 7: Summary of results obtained by the tested neural networks for training performance and test accuracy.

PREDICTION LOGIC	*AREA*	*ANN ARCHITECTURE*				*TRAINING (80%)*			*TEST (20%)*			*ACCURACY*
		Name	*Layers*	*Neurons per Layer*	*Activation Function*	*Data*	*Epochs*	*Performance*	*Dados*	*Matriz de Confusão*		*F1-Score*
1st: IATA/ANAC Delay Group	A (Airport - SBGR)	ANN - A1	3	20	TANSIG	396192	785	54%	99048	12918 4820	80897 413	0,134
	A (Airport - SBGR)	ANN - A2	3	20	LOSIG	396192	500	54%	99048	11733 4594	82082 639	0,124
	B (Airline - GLO)	**ANN - B1**	**3**	**20**	**TANSIG**	**63981**	**554**	**54%**	**15995**	**2227** **1299**	**12155** **314**	**0,158**
	B (Airline - GLO)	ANN - B2	3	20	LOSIG	63981	500	54%	15995	1864 1182	12518 431	0,143
2nd: Delay Interval	**A (Airport - SBGR)**	**ANN - A1**	**3**	**20**	**TANSIG**	**233790**	**500**	**69%**	**58448**	**11905** **18011**	**14453** **14079**	**0,444**
	A (Airport - SBGR)	ANN - A2	3	20	LOSIG	233790	500	56%	58448	11716 32090	14642 0	0,200
	B (Airline - GLO)	ANN - B1	3	20	TANSIG	63919	500	64%	15980	4037 5119	4190 2634	0,417
	B (Airline - GLO)	ANN - B2	3	20	LOSIG	63919	500	58%	15980	4606 7753	3621 0	0,2885

Although still significant for the second prediction logic, the reduction of false negatives represents a better balance of the classes adopted in the prediction. However, even with only one dimension applied in the adopted classes (delay time), the groups assigned to the "delay" situation are larger than those for non-delay cases.

Thus, although the selected influential variables are a possible cause for the models not reaching the acceptable ranges of accuracy obtained in the first part of the study, the distribution of the adopted classes in both logics can also be pointed out as a consequence of the observed responses, as they prioritize delays over non-delay cases.

5. CONCLUSIONS

Based on the discussions presented, there is a clear trend towards applying more robust methods of data analysis and regression for predicting delays in global aviation. Given the multitude of machine learning methods available, some stand out in terms of complexity and availability of the required information for conducting these predictions.

In the conducted case study, the analyses for SBGR (airport) proved to be more efficient than for the selected airline, GLO. However, the accuracy obtained is outside acceptable limits. It is assumed that the required data lead time, with the availability of less specific data, contributed to this result.

This situation highlights the need for a specific analysis of variables since, enumerating the causes, specifying the

responses by delay group can be an alternative to the first prediction logic used.

Despite the considerable amount of data used, defining isolated prediction models for each type of delay, by using specific variables for each expected output, the classification logic based on delay groups and causes may achieve higher accuracies both in airport operations and airlines.

Additionally, another limiting factor to consider in the study is the use of only one prediction method. Even with the adaptive capacity of ANN architectures, other models defined in the first part can be tested for the range of accuracy for the applied set of variables.

Therefore, the study manages to prove that the accuracy of the methods is linked to the specific definition of the area to be analyzed and the main factors that generate these occurrences.

Considering the applied methodology, some recommendations for further work can be enumerated to enhance the solution's effectiveness, such as obtaining specific technical information about the analyzed airport, including knowledge about the preceding and subsequent stages of each flight or the instrumentation used for takeoff and the runway and threshold used.

The use of network variables to improve model estimation, and defining the interactions between these variables and the influencing factor, can also be explored. Additionally, the use of time series in high-dimensional and high-frequency data can aim for specificity for each flight.

Lastly, for assigning prediction classes, an alternative to be tested is the serial comparison, where each delay group is individually tested against the non-delay group to minimize the dimensionality issue.

REFERENCES

AENA. (2016). *AENA BRASIL*. Fonte: https://www.aenabrasil.com.br/pt/aeroportos/aeroporto-internacional-do-recife-guararapes-gilberto-freyre/Caracteristicas.html

ANAC. (04 de 02 de 2021). *Metadados do conjunto de dados: Percentuais de atrasos e cancelamentos.* Fonte: Agência Nacional de Aviação Civil: https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas/percentuais-de-atrasos-e-cancelamentos

Arjomandi, A., Dakpo, K., & Seufert, J. (2018). Have Asian airlines caught up with European Airlines? A by-production efficiency analysis. *Transportation Research Part A*, pp. 389-403.

Arora, S. D., & Mathur, S. (2020). Effect of airline choice and temporality on flight delays. *Journal of Air Transportation Managemant*.

Button, K. (2019). Applied economics and understanding trends in air transportation policy. *Transport Policy*, *80*, 78-85.

Button, K. (2019). Applied economics and understanding trends in air transportation policy. *Transport Policy*.

Chen, Y.-H., & Lin, J.-J. (2021). Determinants of flight delays at East Asian airports from an airport, route and network perspective . *Journal of Air Transport Management*.

Chen, Z., & Wang, Y. (2019). Impacts of severe weather events on high-speed rail and aviation delays. *Transportation Research Part D, 69*, 168-183.

Chen, Z., Wang, Y., & Zhou, L. (2021). Predicting weather-induced delays of high-speed rail and aviation in China. *Transport Policy*, *101*, 1-13.

Chen, Z., Wang, Y., & Zhou, L. (2021). Predicting weather-induced delays of high-speed rail and aviation in China. *Transport Policy, 101*, 1-13.

Chicco, D., & Jurman, G. (21 de Junho de 2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC genomics*.

Christopher J. , O., D. S. Prasada , R., & George E., B. (2008). Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios. *Empirical Economics*, pp. 231-255.

Chung, H. M., Kwon, O. K., Han, O. S., & Kim, H.-J. (2020). Evolving network characteristics if the asian international aviation market: A weighted network approach. *Transport Policy*.

Chung, S.-H., Ma, H.-L., Hansen, M., & Choi, T.-M. (2020). Data science and analytics in aviation. *Transportation Research Part E, 134*.

Drummond M, Barbieri M, Cook J, Glick HA, Lis J, Malik F, et al. Transferability of economic evaluations across jurisdictions: ISPOR Good Research Practices Task Force report. Value Health. 2009;12(4):409–18.

Garrow, L., German, B., & Leonard, C. (2021). Urban air mobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research. *Transportation Research Part A*.

IBGE, I. (2020). *Censo 2010: Índice de desenvolvimento humano municipal*.

Karlaftis, M. G., & Vlahogianni, E. I. (2011). Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights. *Transportation*

Research Part C: Emerging Technologies, 387-399.

Kaye, S.-A., Somoray, K., Rodwell, D., & Lewis, I. (2021). Users' acceptance of private automated vehicles: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Safety Research*, pp. 352-367.

Khan, W. A., Ma, H.-L., Chung, S.-H., & Wen, X. (2021). Hierarchical integrated machine learning model for predicting flight departure delays and duration in series. *Transportation Research Part C, 129*.

Lambelho, M., Mitici, M., Pickup, S., & Marsden, A. (2020). Assessing strategic flight schedules at an airport using machine learning-based flight delay and cancellation predictions. *Journal of Air Transport Management*.

Liu, Y., Liu, Y., Hansen, M., Pozdnukhov, A., & Zhang, D. (2019). Using machine learning to analyze air traffic management actions: Ground delay program case study. *Transportation Research Part E, 131*, 80-95.

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.

Luger, G. F. (2004). *Inteligência Artificial: Estruturas e Estratégias para a resolução de problemas complexos.* Porto Alegre: Bookmann.

Marcy, M. C. (2017). *METODOLOGIA BASEADA EM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA A DETECÇÃO DE DANOS ESTRUTURAIS.* Brasília: Tese de Doutorado apresentada a Universidade de Brasília - UnB.

Odeck, J., & Bråthen, S. (2012). A meta-analysis of DEA and SFA studies of the technical efficiency of seaports: A comparison of fixed and random-effects regression models. *Transportation Research Part A*, pp. 1574-1585.

Oliveira Filho, P. (2015). *Epidemologia e bioestatística: Fundamentos para a leitura crítica.* Rio de Janeiro: Editora Rubio.

Oliveira, M., Eufrásio, A. R., Guterres, M. X., Murça, M. C., & Gomes, R. (2021). Analysis of airport weather impact on on-time performance of arrival flights for the Brazilian domestic air transportation system. *Journal of Air Transport Management*.

Rennert, L. (2022). meta-analysis of the impact of rail stations on property values: Applying a transit planning lens. *Transportation Research Part A*, pp. 165-180.

Scarpel, R., & Pelicioni, L. (2018). A data analytics approach for anticipating congested days at the São Paulo International Airport. *Journal of Air Transport Management*.

Schultz, M., & Reitmann, S. (2019). Machine learning approach to predict aircraft boarding. *Transportation Research Part C, 98*, 391–408.

Simon, H. (1983). Why should machines learn? Em R. S. Michalski, J. G. Carbonell, & T. M. Mitchell, *Machine Learning: An Artificial Intelligence Approach* (pp. 25-37). Berlin : Springer-Verlag.

Singh, V., Singh, V., & Vaibhav, S. (2020). A review and simple meta-analysis of factors influencing adoption of electric vehicles. *Transportation Research Part D*.

Stivali, M. (2022). *Valor de uma vida estatística: uma revisão da literatura empírica para o Brasil.* Brasília - DF. Brasil.: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Programa de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional - PNPD.

Truong, D. (2021). Using causal machine learning for predicting the risk of flight delays in air transportation. *Journal of Air Transport Management, 91*.

Wang, A., Xu, J., Tu, R., Saleh, M., & Hatzopoulou, M. (2020). Potential of machine learning for prediction of traffic related air pollution. *Transportation Research Part D*.

Wang, C., & Wang, X. (2019). Airport congestion delays and airline networks. *Transportation Research Part E, 122*, 328–349.

Wardman, M. (2022). Meta-analysis of price elasticities of travel demand in great britain: Update and extension. *Transportation Research Part A*, pp. 1-18.

Wei, K., & Vazea, V. (2018). Modeling Crew Itineraries and Delays in the National Air Transportation System. *Transportation Science*.

Yen, B., & Li, J.-S. (2022). Route-based performance evaluation for airlines – A metafrontier data envelopment analysis approach. *Transportation Research Part E*.

Yu, B., Guo, Z., Asian, S., Wang, H., & Chen, G. (2019). Flight delay prediction for commercial air transport: A deep learning approach. *Transportation Research Part E, 125*, 203-221.

.

PROPOSTA DE MODELO DE TREINAMENTO PARA PILOTOS NA FASE DE TRANSIÇÃO DE AERONAVES COMERCIAIS PARA MITIGAR CONFUSÃO DE MODOS DE CONTROLE DE TRAÇÃO

Anderson Matos de Castro*
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Pós-Graduação em Segurança de Aviação e Aeronavegabilidade Continuada – MP-Safety
Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: matos.aero@gmail.com

PAPER ID: SIT2321

ABSTRACT

The development of the first autopilots in the 1930s can be considered the first step towards automation in airplanes. Various industries experienced significant transformations, especially the commercial aviation sector through technology that automates procedures in the cockpit. Although automation has brought considerable benefits to operations and the control of human-machine interaction systems, there is growing empirical evidence pointing to some negative effects, especially regarding human monitoring performance. In light of this, the present research seeks to answer the following question: How can the confusion of thrust modes to which airline pilots are subjected be mitigated when migrating to a new aircraft? This paper aims to propose a training model for pilots transitioning between commercial aircraft, in order to mitigate the adverse effects of automation. To this end, this work proposes the application of a semi-structured questionnaire, used to identify common errors for each type of transition. As partial results, the following most present responses were obtained in situations that may generate confusion, in this order: "interpretation of the modes presented in the FMA (Flight Mode Announcer: the area of the instrument panel that displays the active autopilot and traction management modes) of the aircraft", "sequence of actions during go-around" and "management of vertical navigation". Based on the partial results, a conceptual model was developed in order to add important elements to the training, such as: Pilot Background Assessment, Common Errors Guide and Competence Map of the current Training Program structure - proposed product of this dissertation. The information obtained in this research can be used by airlines to identify situations where mode confusion occurs and apply measures that mitigate the adverse effects of automation.

Keywords: Automation, airplanes, pilots, training, confusion.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a definição mais aceita para automação consiste em sistemas ou métodos em que processos de produção são automaticamente desempenhados ou controlados por máquinas ou dispositivos eletrônicos (BILLINGS, 1996).

Tarnowski e Speyer (2020) ressaltam que a concepção de automação aplicada para aeronaves da família Airbus, por exemplo, pode ser sintetizada através das seguintes afirmações: (i) automação é um complemento ao ser humano; (ii) automação melhora segurança de voo e eficiência; e (iii) automação é feita sob medida e ajustada ao ser humano.

É possível destacar como benefícios da automação os seguintes elementos: a redução da carga de trabalho do operador e diminuição da fadiga pela liberação de ações repetitivas, utilização mais econômica do equipamento, aumento da capacidade produtiva e aeronaves mais protegidas contra falhas humanas. Logo,

cabe ressaltar que a automação não elimina o erro ou falha humana, e sim muda a sua natureza (REASON, 1990).

Embora a automação tenha trazido consideráveis benefícios às operações e para o controle de sistemas de interação homem-máquina, existe uma crescente evidência empírica apontando para alguns efeitos negativos, especialmente em relação a performance de monitoramento humano, a exemplo a confusão que pode ocorrer em pilotos na transição para um novo modelo de avião. (MOULOUA et al., 2010).

A confusão apresentada por pilotos de avião em sua operação remonta os primórdios da aviação. Lyu et al. (2018) denominam de "confusão de modo", que em linhas gerais significa a circunstância em que ocorre divergência entre a expectativa do piloto quanto ao comportamento da aeronave e o real status do sistema de voo automático, especialmente em momentos de alteração de perfil vertical de voo.

Um acidente de repercussão internacional ocorreu em 6 de julho de 2013 quando um Boeing 777-200ER operado pela Asiana colidiu com o quebra-mar da pista 28L no Aeroporto Internacional de San Francisco, Califórnia (GORMAN et al., 2018). De acordo com o relatório final do acidente, o comandante do voo Asiana 214 informou para a equipe de investigação que durante a aproximação para pouso, acreditava que o sistema de gerenciamento de potência automática do Boeing 777-200ER (HL-7742) se comportaria semelhante ao Airbus 320, modelo de aeronave em que possuía experiência de voo mais recente (NTSB, 2014).

Dessa forma, a causa raiz que envolve cada um desses fatores pode ser atribuída a vários níveis da organização, o que significa que o acidente não tratou de um evento isolado causado exclusivamente por aspectos de fatores humanos (BANDEIRA et al., 2018; SMALL, 2020). Conforme apontado por Kharoufah et al. (2018), aspectos de fatores humanos estão entre os principais fatores contribuintes para os acidentes e incidentes na aviação comercial entre 2000 e 2016. Dentre as diversas questões envolvendo fatores humanos, os aspectos fisiológicos, e em especial a fadiga mental também merecem destaque ao se avaliar falhas humanas na aviação comercial (CALDWELL, 2005). Essas questões fisiológicas estão fora do escopo do presente trabalho, porém podem degradar os níveis de atenção e memória, prejudicando o desempenho dos pilotos durante suas transições de equipamento. Isso porquê esses fatores são classificados como habilidades, e estão diretamente associados com os fatores humanos relacionados à fadiga por exemplo. Assim, quanto maior for a fadiga mais degradado será o nível de atenção e memória (BANDEIRA et al., 2018)

Diante desses eventos de grande percussão, observa-se uma lacuna para problemas dessa natureza: Como mitigar a confusão de modos de tração a que pilotos de linha aérea estão sujeitos ao migrarem para uma nova aeronave?

Desse modo, este artigo visa propor um modelo de treinamento para pilotos em transição de aeronaves comerciais, de modo que seja possível mitigar os efeitos adversos da automação presente nos sistemas de gerenciamento de tração. Para tanto, pretende-se desenvolver uma ferramenta de avaliação de domínio de competências em simulador, a ser inserido em programa de treinamento de pilotos que estão em processo de transição de equipamentos, a fim de reduzir a confusão entre as diferentes filosofias de automatismo quanto ao gerenciamento de tração (*autothrust* ou *autothrottle*) de diferentes fabricantes de aeronaves comerciais de transporte de passageiros e carga.

2. AUTOMAÇÃO NAS CABINES DE COMANDO

Em 30 de janeiro de 1995, a revista Aviation Week apresentou uma lista de mais de 150 acidentes e incidentes cujos fatores contribuintes envolviam consciência situacional, incluindo o Airbus A320 da Indian Airlines voo IC605 em Bangalore (Índia), o Airbus A320 da Air France voo AF296Q em Mulhouse (França) e um Airbus A330 em Toulouse em voo de teste da fabricante. Esses eventos revelam que pilotos por vezes ficam confusos quanto ao modo de automatismo da aeronave. Mesmo uma análise superficial desses eventos permite destacar que a confusão de modos de tração é mais complexa do que a deficiência de treinamento e *design* de cabine de comando (BUTLER, 1998).

A esse tipo de erro de interpretação por parte do piloto na literatura de fatores

humanos aplicados à aviação, dá-se a classificação "*Mode Error*" (Erro de modo). Ele ocorre quando há incorreta compreensão de como a automação deveria agir ou do seu real estado (CHOW *et al*., 2014). De acordo com Nadine Sarter, uma especialista em fatores humanos da Universidade de Michigan, trata-se do tipo mais comum de erro atribuído aos pilotos de aeronaves.

A literatura destaca que muitas dimensões podem ser observadas a fim de analisar como o operador da aeronave desenvolve suas atividades em conjunto com o automatismo. Com base no levantamento da literatura foram selecionados os fatores que mais contribuem com a análise da confusão de pilotos, dentro do escopo deste trabalho. Assim, os fatores que serão tratados aqui são: i) carga de trabalho mental; ii) treinamento dos pilotos; iii) confusão de interpretação do automatismo; iv) complacência; v) degradação de desempenho; e vi) interface homem-máquina.

As evidências apontam que automação pode alterar a carga de trabalho mental de um operador humano a um nível que seja adequado para a esperada execução de tarefas de um sistema. Em outras palavras, a máquina assume um papel de organizar os dados em uma ordem de prioridade, por exemplo, de forma a servir de suporte a quem a opera a fim de prover uma tomada de decisão objetiva a partir das informações mais relevantes (PARASURAMAN et al., 2000).

Ao se considerar o método de treinamento pilotos aplicado ao longo da história, a responsabilidade primária é introduzir e manter habilidades em níveis de proficiência requeridos para o cumprimento das missões de forma exitosa. Treinamento inicial rápido e de alta qualidade deve ser provido. As fases iniciais de instrução tem como objetivo criar uma memória e aprendizado de longa duração ainda que as habilidades desenvolvidas não sejam diariamente praticadas (ROSE, 1989).

É pacífico que o modelo mental de um sistema depende tanto do treinamento e da experiência prévia do ser humano que opera este sistema quanto da correta percepção e interpretação do estado real do ambiente (SILVA; HANSMAN, 2015). Com o desenvolvimento dos sistemas complexos na indústria aeronáutica, há um aumento em treinamento para sua operação. A aprendizagem em um sistema complexo com múltiplos modos de automação é um processo lento. Dessa forma, pilotos relatam que frequentemente um treinamento adicional seria recomendado (SCERBO, 1996).

No Brasil, fica sob responsabilidade da ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil, a normatização dos requisitos de treinamento de tripulantes. De acordo com o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil, que versa sobre requisitos para transporte de passageiros em linha aérea regular, o programa geral de treinamento deve ser elaborado pela empresa transportadora e obter aprovação da agência reguladora fazendo constar, entre outros requisitos (ANAC, 2021):

- Meios adequados, em solo e em voo, assim como instrutores qualificados e examinadores do detentor de certificado devidamente aprovados;
- Constar do treinamento de solo e de voo para os membros da tripulação de voo, instrutores e examinadores credenciados do detentor de certificado, no tipo ou nos tipos dos aviões que operam;
- Treinamento de coordenação adequada da tripulação de voo, assim como treinamento em todos os tipos de situações ou procedimentos de emergência e anormais causados pelo mau funcionamento do sistema moto propulsor, da célula, de outros sistemas da aeronave devido a incêndio ou outra anomalia.

O Programa de Treinamento atual da ANAC prevê a carga horária e o detalhamento do conteúdo programático de cada aula teórica e sessão de simulador com as respectivas manobras e exercícios. Esse documento é comumente chamado de PTO - Programa de Treinamento Operacional.

É importante notar que, esse documento prevê a mesma programação de instrução para os pilotos independentemente da sua formação e experiência anterior. Além disso, a agência reguladora apenas estabelece requisito prevendo treinamento que leve em consideração o *background* do piloto para cursos entre as diferenças, isto é, variações de modelos de aeronaves de mesmo tipo. Exemplos de diferenças são Embraer 195 e Embraer 195-2; Airbus A320 e A321 e Boeing 737NG e Boeing 737 MAX.

Em 30 de janeiro de 1995, a revista Aviation Week apresentou uma lista de mais de 150 acidentes e incidentes cujos fatores

contribuintes envolviam consciência situacional, incluindo o Airbus A320 da Indiana Airlines voo IC605 em Bangalore (Índia), o Airbus A320 da Air France voo AF296Q em Mulhouse (França) e um Airbus A330 em Toulouse em voo de teste da fabricante. Esses eventos revelam que pilotos por vezes ficam confusos quanto ao modo de automatismo da aeronave. Mesmo uma análise superficial desses eventos permite destacar que a confusão de modos de tração é mais complexa do que a deficiência de treinamento e *design* de cabine de comando (BUTLER, 1998).

A esse tipo de erro de interpretação por parte do piloto na literatura de fatores humanos aplicados à aviação, dá-se a classificação "*Mode Error*" (Erro de modo). Ele ocorre quando há incorreta compreensão de como a automação deveria agir ou do seu real estado (CHOW *et al*., 2014). De acordo com Nadine Sarter, uma especialista em fatores humanos da Universidade de Michigan, trata-se do tipo mais comum de erro atribuído aos pilotos de aeronaves.

3. SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE TRAÇÃO DAS AERONAVES

Esse Capítulo versa sobre os elementos que compõem o regulamento de treinamento de pilotos no País e, em seguida, apresenta e compara os sistemas responsáveis pelo gerenciamento de tração das aeronaves ATR72-600, Embraer 195 e Airbus A320. Tais aeronaves são majoritariamente responsáveis pela frota destinada a voos domésticos no Brasil.

3.1 Arquiteturas dos Sistemas de Gerenciamento de Tração

As respectivas arquiteturas de gerenciamento de tração são denominadas da seguinte forma:

- Embraer 195: Autothrottle (A/T);
- Airbus 320: Autothrust (A/THR);• ATR72-600: não possui;

Como cada fabricante adota sua nomenclatura própria para cada sistema embarcado na aeronave, este texto trata essas arquiteturas genericamente de TMS (Thrust Management System – Sistema de Gerenciamento de Tração).

O TMS controla a tração e, por consequência, a velocidade desenvolvida pela aeronave desde o momento da decolagem até o pouso. Ao ligar esse sistema, o piloto ativa a função que ajusta automaticamente a tração necessária a fim de manter a velocidade estabelecida no painel da cabine de comando.

Esse sistema auxilia na redução da carga de trabalho dos pilotos em momentos como manutenção de velocidade em situações de turbulência e de restrições de velocidade em espaços aéreos controlados inseridas na programação do computador de voo. O TMS permite esse controle de redução lenta e gradual de empuxo a fim de manter a velocidade constante. As variações de temperatura durante subidas e descidas também são levadas em consideração a fim de manter o parâmetro de velocidade constante e otimizar o consumo de combustível. A seguir, são apresentadas as especificidades de TMS de cada fabricante sob análise nesse trabalho.

3.2 ATR72-600

O gerenciamento de tração dessa aeronave é composto pela posição das manetes de tração (*power levers*), manetes de controle de hélice (*condition levers*) e pelo *knob* PWR MGT (*Power Management*) conforme indicado na Figura 1.

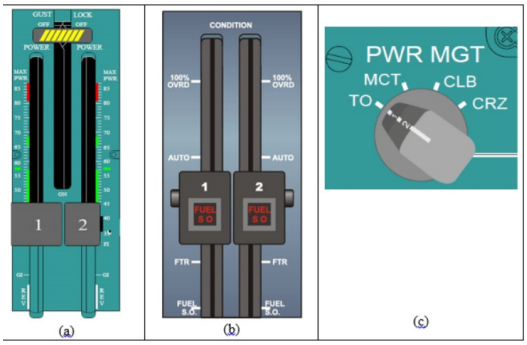


Figura 1 – Elementos de controle de tração ATR72-600 (ATR AIRCRAFT, 2020).

A aeronave ATR72-600 é um turboélice equipado com dois motores Pratt & Whitney PW127 M/N certificados para 2750 SHP (*shaft horsepower*) e hélices hexapás modelos Hamilton 568F.

Uma vez que essa aeronave não dispõe de sistema de gerenciamento automático de tração, tal controle é exercido pela combinação de configuração desses três dispositivos. Durante uma operação normal de voo, as manetes de potência (Figura 1a) ficam ajustadas dentro da faixa verde, as *condition levers* (Figura 1b) ficam na posição AUTO e o knob PWR MGT (Figura 1c), a depender do regime de voo, fica ajustado em uma das seguintes posições (ATR AIRCRAFT, 2020):

• TO: para decolagens até a altitude de aceleração (normalmente entre 400 e 1000 pés acima da altitude do aeroporto);

• MCT (Maximum continuous thrust): em situações de anormalidade de potência conforme o *checklist* apropriado definir;

• CLB (Climb): para uma subida normal após a altitude de aceleração; e

• CRZ (Cruise): para voo em cruzeiro.

Quando o piloto ajusta a velocidade desejada, o piloto automático ajusta a atitude de voo (nariz para cima ou nariz para baixo) por meio da alteração da posição da superfície de comando profundor. Caso a aeronave fique com velocidade abaixo do desejado, o piloto deve aumentar manualmente a tração avançando as manetes. Caso a aeronave fique com velocidade acima do programado, o piloto recua as manetes de tração. Logo, trata-se de um ajuste completamente manual.

3.3 EMBRAER 195

O Embraer 195 é um jato bimotor utilizado para transporte de passageiros e carga equipado com motores General Electric CF34-10E.

O seu TMS tem conexão com o Flight Guidance Control System (FGCS) a fim de controlar velocidade e tração desenvolvida pelo grupo motopropulsor. O TMS ajuda a reduzir consumo de combustível e aumenta a vida útil do motor limitando tração, velocidade e temperaturas requeridas para cada fase específica de voo. Tal sistema possui as seguintes subfunções:

• Autothrottle (A/T);

• Thrust rating system (TRS); e

• Thrust lever angle (TLA) trim.

O TMS move as manetes de potência a fim de manter a velocidade ou potência desejada de acordo com o modo apropriado (EMBRAER, 2021).

A Figura 2 ilustra as manetes de tração (3a) com seus respectivos *detents* e o seletor do A/T (3b). O TMS é armado antes da decolagem e ativa-se quando o *pilot flying* (PF) avança as manetes de tração para decolagem. Nesse momento, o sistema completa a aceleração até a posição TO/GA levando a aeronave até a tração configurada para decolagem. As manetes permanecem nessa posição até a conclusão da subida e início da fase de cruzeiro.

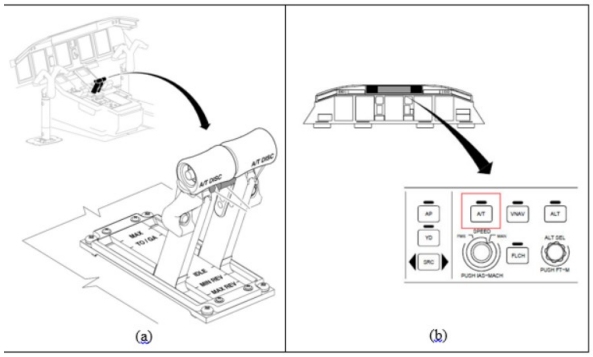


Figura 2 – Elementos de controle de tração Embraer 195 (EMBRAER, 2021).

A partir dessa fase, qualquer alteração de velocidade executada pelo PF no computador de voo ou painel central de comando do piloto automático ocasiona mudança de posição das manetes automaticamente com o sistema ligado.

O TMS é armado antes da decolagem e ativa-se quando o PF avança as manetes de tração para decolagem. Nesse momento, o sistema completa a aceleração até a posição TO/GA levando a aeronave até a tração configurada para decolagem.

As manetes permanecem nessa posição até a conclusão da subida e início da fase de cruzeiro. A partir dessa fase, qualquer alteração de velocidade executada pelo PF no computador de voo ou painel central de comando do piloto automático ocasiona mudança de posição das manetes automaticamente com o sistema ligado.

3.4 AIRBUS A320 NEO

O Airbus A320 NEO é um jato birreator utilizado para transporte de passageiros e carga equipado com motores CFM-LEAP-1A.

Seu TMS é chamado pelo fabricante de *Autothrust* (A/THR), diferentemente das linhas Embraer e Boeing (*Autothrottle*) cujos sistemas possuem manetes que se movem de acordo com a tração desenvolvida pelos motores. Neste fabricante, o TMS mantém as manetes na mesma posição (CL) independentemente da aeronave aumentar ou diminuir a tração a partir da fase de decolagem até o pouso.

De acordo com o manual da fabricante AZUL LINHAS AÉREAS (2022), o TMS pode estar nas condições: armado, ativado, ou desconectado. Quando ativado, dois modos ficam disponíveis:

• SPEED/MACH: o TMS ajusta continuamente a tração a fim de manter a

velocidade configurada pelos pilotos nos instrumentos de bordo; e

• THRUST: o TMS mantém tração fixa.

A Figura 3 apresenta o painel de seleção de proa, modo de descida, velocidade e altitude localizado no controle central da cabine de comando da aeronave denominado FCU (Flight Control Unit).

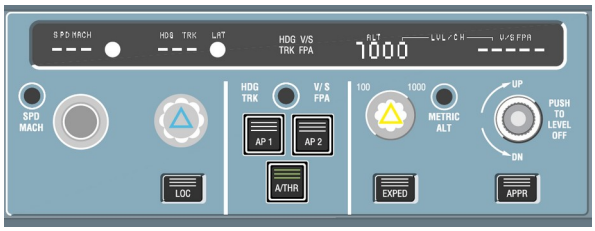


Figura 3 – Flight Control Unit do A320 (AZUL LINHAS AÉREAS, 2022).

Os modos de TMS são automaticamente conectados com os modos verticais de piloto automático (AP) e diretor de voo (FD). Quando o modo vertical de AP/FD controla trajetória (captura de altitude, manutenção de altitude, velocidade vertical constante, *Glide Slope*), o TMS está em modo SPEED/MACH. Contudo, quando o modo vertical AP/FD controla a atitude da aeronave para manter uma velocidade pré-ajustada (subida/descida, por exemplos), o TMS está em THRUST.

No momento que o TMS estiver armado, os FADECs calculam os comandos de tração de acordo com a posição das manetes de potência e as configurações de desempenho do computador de voo na página de performance de decolagem. Quando o TMS estiver desconectado, os FADECs alculam os comandos de tração de acordo com a posição da manetes de potência. A Figura 4 apresenta o grupo de manetes de tração e seus respectivos comandos.

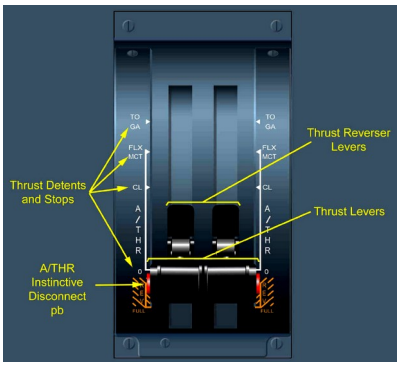


Figura 4 – Manetes de Tração do A320 (AZUL LINHAS AÉREAS, 2022).

Uma vez que o TMS estiver ativo, o ajuste de tração é enviado para os FADECs (Full Authority Digital Engine Control) – computadores que ajustam a tração desejada levando em conta o *status* da aeronave (peso e balanceamento) e do ambiente (temperatura e pressão do ar externo). Por sua vez, os sinais de comando de variação de tração são enviados do FADEC para os motores.

As manetes possuem dois botões de desconecção e quatro *detents*, a saber:

• IDLE: para marcha lenta no solo e no pouso antes da aplicação de reversor;

• CL (Climb): para subida em rota, cruzeiro, descida e aproximação;

• FLX-MCT: para decolagem com redução de tração e para operação contínua em situação monomotor;

• TO/GA: para decolagem com máxima potência disponível e arremetida.

Os pilotos usam as manetes para:

• Armar, ativar ou desconectar o TMS;

• Ativar os modos de decolagem e arremetida (TO/GA);

• Controlar manualmente a tração de cada motor quando TMS estiver desconectado; e

• Ativar o reversor de empuxo.

4. METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente trabalho trata-se de um estudo qualitativo, etnográfico, com aplicação exploratória por meio de pesquisa documental a partir de normativos aeronáuticos emitidos por órgãos oficiais, dos manuais das aeronaves envolvidas (ATR72-600, Embraer 195 e AIRBUS A320), artigos acadêmicos, livros e levantamento de dados por meio de entrevista semiestruturada submetida a instrutores e pilotos brasileiros de linha aérea. A Figura 5 apresenta o escopo metodológico.

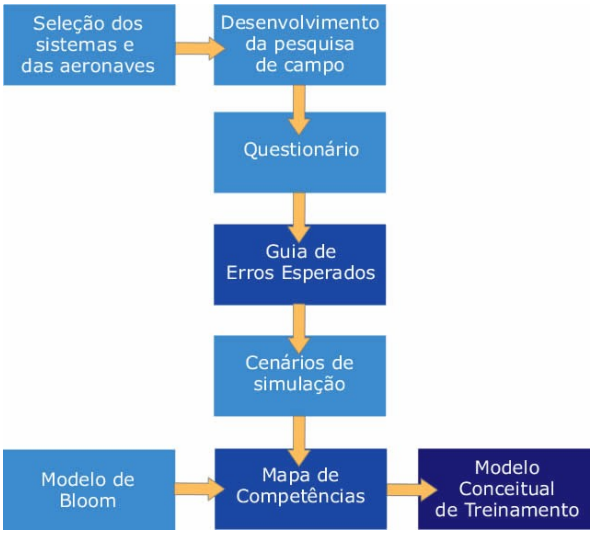


Figura 5 – Estrutura da Metodologia.

Foram selecionadas as aeronaves ATR72, Embraer 195 e A320 devido à

familiaridade com essas aeronaves. O sistema escolhido foi o Gerenciamento de Tração, visto que cada fabricante possui suas particularidades quanto a esse aspecto.

O desenvolvimento da pesquisa de campo é resultado da pesquisa bibliográfica quanto aos fatores relacionados a confusão gerada pela automação como visto no tópico 2. Posteriormente, foram entrevistados instrutores de voo a fim de investigar tópicos a serem incluídos no questionário para identificar as situações típicas de confusão de cada transição de equipamento.

As informações colhidas pelo questionário deram origem ao Guia de Erros Esperados (uma relação dos principais equívocos dos pilotos em treinamento). Esse guia tem aplicação nos cenários de simulação a fim de contemplar as circunstâncias de confusão no âmbito das manobras previstas.

O Modelo de Bloom, conforme a FAA (2020), foi utilizado para atribuir graus de domínio de cada competência, ou seja, cada situação passível de confusão.

A combinação do modelo com a relação dos erros mais comuns dá origem ao Mapa de Competências que, junto com o Guia de Erros Esperados, constituem o **Modelo Conceitual de Treinamento**, produto final desse artigo.

4.1 Regulamentação e Treinamento

O treinamento de pilotos de empresas de linha aérea é regido pelo Regulamento de Aviação Civil 121 (ANAC, 2021). A Agência Nacional de Aviação Civil estabelece requisitos mínimos de treinamento e capacitação dos tripulantes técnicos, mas permite que cada companhia estabeleça seu programa de treinamento, que passa por um processo de aprovação por parte da agência.

O Programa de Treinamento aprovado possui a relação dos exercícios e sistemas da aeronave que fazem parte da instrução e avaliação dos pilotos. No entanto, esse documento não define o roteiro de aplicação de cada manobra. Tal especificação faz parte do Guia de Instrução onde os exercícios são organizados em uma linha temporal para servir de referência ao piloto-instrutor que aplica a sessão de treinamento.

Antes do início de cada sessão de treinamento, é realizado um *briefing* de uma hora e meia de duração em uma sala de aula com a finalidade de apresentar os conteúdos a serem ministrados de acordo com o Programa de Treinamento específico para determinada sessão e esclarecimento de dúvidas quanto à aplicação de procedimento e compreensão de sistemas da aeronave.

Na sequência, pilotos e instrutor seguem ao simulador e, assim, inicia-se a sessão. Durante o *briefing*, o instrutor pode apenas apresentar as manobras a serem executadas conforme preconizado no Programa de Treinamento ou, adicionalmente, investigar as dúvidas dos alunos. No entanto, não existe uma diretriz a fim de considerar o *background* que cada piloto traz consigo. O mesmo programa é aplicado a todos, onde se espera que, apesar das nuances dos dados de entrada, obtenha-se a mesma saída: pilotos capacitados na aeronave.

4.2 Pesquisa de Campo com Pilotos

Com o intuito de levantar dados, foi realizada uma pesquisa em campo com pilotos por meio de entrevista semiestruturada. Com base nos resultados obtidos com a pesquisa serão selecionados os principais erros que envolvem automatismo em transição de equipamentos

No primeiro momento, o questionário-piloto foi desenvolvido e validado com cinco especialistas do setor de treinamento, que contribuíram para ajustes nas questões e possíveis respostas destacando erros comuns, fatores organizacionais e sugerindo que os respondentes compartilhassem experiências em que houve algum evento envolvendo confusão e automatismo. Em seguida, o questionário foi aplicado ao público de interesse.

As entrevistas foram compostas por questões abertas e de múltipla escolha, a fim de facilitar a reflexão dos entrevistados quanto às suas experiências, realizada no período de outubro a dezembro de 2022 por meio do recurso *Google Forms* a fim de ampliar o alcance das respostas. Objetivou-se identificar em que circunstâncias de voo a diferente filosofia de automação aplicada pode gerar dúvida na operação por parte dos pilotos e identificar as vulnerabilidades advindas da transição de aeronaves.

Para cada entrevistado, houve um alinhamento do entendimento das questões, contextualização da pesquisa de cunho acadêmico e solicitação do uso das informações pessoais com total sigilo e confidencialidade. Assim, os entrevistados contribuíram com a pesquisa de forma anônima e voluntária. Importante ressaltar

também que foi possível obter a opinião de todos por meio de encontro pessoal e/ou comunicação via telefone móvel. Adicionalmente, foram entrevistados sete instrutores de voo e simulador. Durante as entrevistas, procurou-se identificar as causas de confusão ou de difícil interpretação do piloto ao lidar com uma filosofia de tecnologia diferente da qual o mesmo estava habituado em aeronave voada anteriormente e quais manobras estão mais sujeitas a possíveis interpretações errôneas.

Observando-se o modelo de treinamento vigente (ANAC, 2021), verificou-se que a experiência prévia do piloto na aeronave anterior não faz parte do processo de transição de equipamentos. Três elementos foram adicionados ao processo de regulamentação e treinamento de pilotos com a finalidade de propor melhoria durante a instrução na nova aeronave: Avaliação de *Background* do Piloto, Guia de Erros Esperados e o Mapa de Competências.

Para a Avaliação do *Background* do Piloto, o instrutor interroga seu aluno a fim de conhecer a aeronave pregressa durante o *briefing*. Com essa informação, o instrutor determina qual Guia de Erros Esperados será utilizado, baseado na última transição de equipamentos realizada por seu aluno. Esse guia serve de referência durante a simulação para submeter o piloto às manobras mais passíveis de confusão considerando a aeronave atual e a anterior.

4.3 Competências x Modelo de Bloom

O Mapa de Competências é uma ficha de avaliação com graus de cumprimento de cada tarefa seguindo o modelo de taxonomia do domínio cognitivo de Bloom (FAA, 2020).

O Modelo de Bloom que permite a apreciação dos seis níveis de domínio cognitivo: conhecimento, compreensão, aplicação, análise, síntese e avaliação, nesta ordem. O preenchimento do Mapa de Competências no *debriefing*, gera os Graus de Competências que retroalimentam o Guia de Erros Esperados. Uma vez preenchido, retroalimenta a Avaliação de *Background* e o Guia de Erros Esperados. O questionário tem como função definir a primeira relação de erros esperados.

O instrutor que julgar que todas os graus de competências de determinado exercício foram satisfatórios preenche o Mapa de Competências conforme a Figura 6.

Caso o instrutor entenda que algum grau de competência mereça ressalva, deve assinalar o respectivo campo com um “X” e preencher a ficha de *debriefing* com comentário pertinente, conforme exemplificado a seguir, Figura 6.

Comentário do instrutor: “*Aluno demonstrou durante o briefing conhecer onde selecionar o modo de descida a fim de interceptar a rampa. Porém, durante a execução, confundiu as ações puxar e pressionar o seletor de modo de descida no painel.*”

A observação do instrutor quanto à Aplicação (terceiro elemento do Modelo de Bloom) subentende-se que o primeiro e segundo grau foram atingidos com sucesso. Porém, o terceiro merece ressalva. Consequentemente, os graus Análise, Síntese e Avaliação são considerados ainda com ressalvas.

Caso o instrutor observe alguma situação em que o piloto tenha demonstrado confusão, tal fato será registrado no *debriefing*, sugerindo-se sua incorporação em uma nova versão de Mapa de Competências caso tenha sido considerado um erro comum na avaliação do grupo de instrutores – conforme a Figura 6 (tabelas compiladas).

	Graus de Competências					
Exercícios (Fonte: questionário)	CN	CP	AP	AN	SI	AV
Interceptação da Rampa por cima						
Mudanças de Modo vertical na aproximação final						
Reação a surpresa de automatismo ou alteração inadvertida no FMA						

Tabela 2 – Mapa de Competências.

	Graus de Competências					
Exercícios (Fonte: questionário)	CN	CP	AP	AN	SI	AV
Mudanças de Modo vertical na aproximação final	-	-	-	-	-	-

Tabela 3 – Exemplo de Mapa de Competências preenchido com todos os itens satisfatórios.

	Graus de Competências					
Exercícios (Fonte: questionário)	CN	CP	AP	AN	SI	AV
Mudanças de Modo vertical na aproximação final	-	-	X	-	-	-

Tabela 4 – Exemplo de Mapa de Competências preenchido com um item em observação.

Figura 6 – Graus Análise, Síntese e Avaliação.

Identificando-as, a proposta é apresentar uma inclusão no programa de treinamento das aeronaves com as circunstâncias de confusão elencadas, levando-se em conta a experiência prévia do piloto.

Propõe-se a adequação nas manobras de treinamento para que o piloto se defronte no simulador com tais situações, elevando sua atenção para confusões futuras e reduzindo a possibilidade de ocorrências em voo real.

5. RESULTADOS

Este tópico apresenta os resultados da pesquisa bibliográfica, comparação dos sistemas de gerenciamento de tração, resultados da pesquisa de campo e proposição de um modelo conceitual de treinamento.

5.1 Análise Descritiva

A partir das respostas colhidas do questionário aplicado aos pilotos que efetuaram alguma das transições de equipamentos em foco, é possível observar as seguintes informações parciais: foram 17 respondentes, sendo sete instrutores, quatro comandantes e seis copilotos.

Considerando a experiência de voo do grupo de pilotos, 30% relataram que possuíam entre 2001 e 4000, 30% entre 4001 e 6000 e 40% entre 6001 e 8000 horas de voo. A Figura 7 ilustra a experiência em horas de voo totais declarada pelos respondentes.

Ao serem perguntados quanto a quantidade de horas de voo na aeronave anterior a atual, 40% responderam até 2000 horas, 20% entre 2001 e 4000, 20% entre 4001 e 6000 e 20% entre 6001 e 8000 horas de voo. A Figura 8 ilustra a experiência em horas de voo declarada pelos respondentes na aeronave anterior a atual.

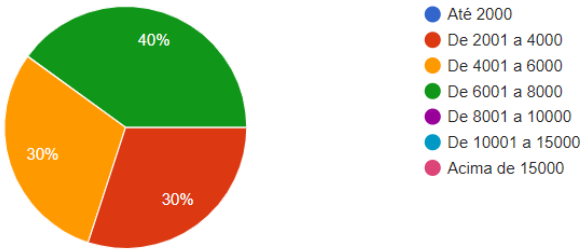


Figura 7 – Experiência em horas de voo.

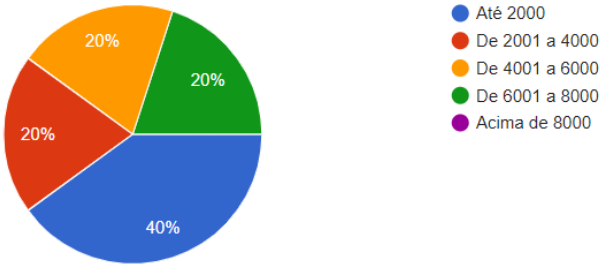


Figura 8 – Hora de voo: aeronave anterior à atual.

Dentro do universo de aeronaves voadas anteriormente por esses pilotos se encontram: A320 (cinco pilotos), ATR72 (dois pilotos), B-737 NG (um piloto) e Embraer (seis pilotos). A Figura 9 apresenta o tipo da aeronave voada anterior a atual.

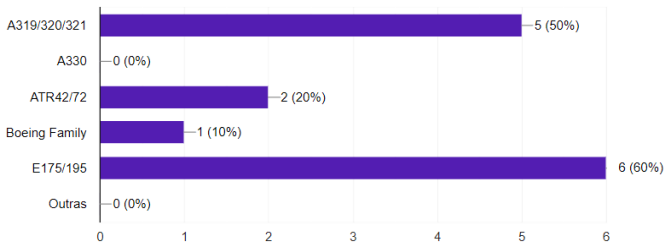


Figura 9 – Aeronave voada anterior a atual.

Das seis transições de equipamentos estudadas, 60% foram do Embraer 195 para o A320, 30% do A320 para ATR72 e 10% do A320 para Embraer. As demais transições possíveis não foram encontradas até esta fase de pesquisa. A Figura 10 apresenta a distribuição da última transição de equipamento dos pilotos respondentes.

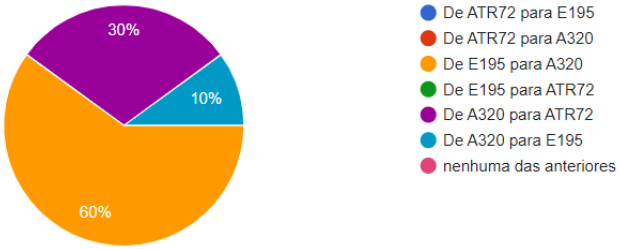


Figura 10 – Última transição de equipamento.

Dentre as situações passíveis de gerar confusão, as respostas mais frequentes foram, respectivamente, "**Interpretação dos modos apresentados no FMA da aeronave**" (10 respostas), "**sequência de ações durante a arremetida**" (11 respostas) e "**gerenciamento da navegação vertical**" (10 respostas).

Outras situações mencionadas como geradoras de confusão foram: (1) ergonomia, (2) memória muscular, pois alguns comandos de *cockpit* são semelhantes entre os diferentes modelos de aeronaves, mas não idênticos, (3) informações divergentes nos manuais da empresa, e (4) pequena diferença na ordem de cumprimento de alguns procedimentos.

Especificamente em relação a essa última situação, ressalta-se, como exemplo, que o comando de trem de pouso é efetuado após a configuração de Flape 3 no E195, sendo que no Airbus ocorre após a seleção de Flape 2. Isso faz com que o piloto que atua nos comandos se confunda com o correto momento de solicitar o trem de pouso para o piloto que monitora).

Os respondentes foram questionados quanto a sua percepção de aprofundamento do assunto automatismo durante o último curso de transição de equipamentos. 10% dos pilotos declararam estar muito satisfeitos, 60% dos pilotos declararam estar satisfeitos, 20% indiferentes e 10% insatisfeitos. Quanto a esse tópico, os instrutores foram convidados a avaliar se o conhecimento de automatismo era deficiente, razoável, bom ou muito bom. 25 % dos instrutores responderam razoável e 75% consideraram que o conhecimento do automatismo de seus alunos foram bons.

A Figura 11 ilustra o nível de satisfação do piloto quanto ao aprofundamento do tópico **automatismo** durante o treinamento de transição de equipamentos. A Figura 12 apresenta a avaliação dos instrutores quanto ao domínio do automatismo dos seus alunos.

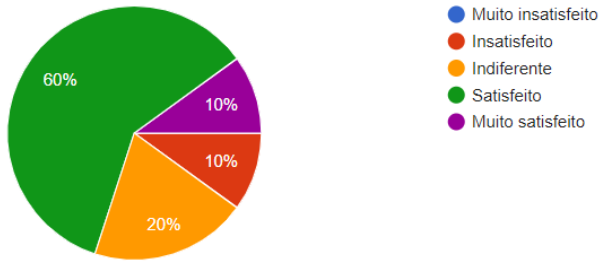


Figura 11 – Nível de satisfação quanto ao aprofundamento do tópico automatismo.

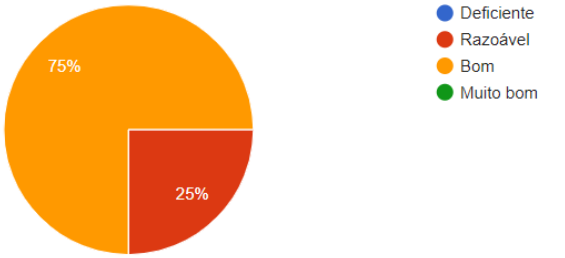


Figura 12 – Avaliação dos instrutores quanto ao domínio de automatismo por parte dos alunos.

Foi pedido para que os respondentes citassem pelo menos um episódio em que o automatismo da aeronave lhe gerou confusão e como a situação foi gerenciada. Dentre as respostas mais frequentes, observou-se que os momentos mais propícios para ocorrer confusões foram durante arremetida e aproximação para pouso. No primeiro caso, foi destacado o modo de *Autothrust* do A320 chamado TOGA LK que "congela" a configuração de potência desenvolvida pelo grupo motopropulsor durante a arremetida e necessita que o piloto pressione o *push buttom* A/THR DISCONNECT para recuperar o controle das manetes de tração. Esse tipo de função não está disponível no E195, tampouco no ATR72.

Outro reporte que gera confusão para pilotos egressos do A320 para o E195 é a diferença de quantidade de comandos no console central (*glareshield*) que atuam sobre a navegação vertical da aeronave.

Um piloto entrevistado reportou que dada a quantidade de comandos de acionamento de modos de navegação vertical no Embraer, a escolha pelo modo desejado se torna mais complexa e que a presença de um comando centralizador de modos de navegação vertical, como no Airbus, tornam a operação mais simples e portanto, com menor chance de confusão entre os modos de tração.

A solução apresentada para lidar com o acionamento indesejado de um modo de descida ou subida foi o desligamento do piloto automático e reacionamento subsequente. Em um evento relatado por um piloto advindo do Embraer durante sua instrução no Airbus, a confusão ocorreu em função de uma vetoração do controle de aproximação do aeroporto. A aeronave estava configurada em "*Approach Phase*", o que significa que as velocidades a serem seguidas pelo sistema de piloto automático e TMS seriam definidas pelo FMS de acordo com o flape selecionado. Após o cancelamento da autorização de aproximação por parte do controle de tráfego aéreo, o piloto em instrução cancelou o modo "*Approach Phase*" definindo uma nova altitude a ser mantida.

Tal fato no Airbus causa aceleração da aeronave diferentemente do que ocorre no Embraer (a aeronave pregressa desse piloto). Neste episódio, evidencia-se que o piloto estava esperando que a aeronave do seu voo de instrução em rota (A320) tivesse o mesmo comportamento da aeronave anterior (E195) que não possuía mudança de velocidade em fase de aproximação alterada pelo fato de descontinuar a aproximação. Quando convidado a sugerir uma forma de mitigar essa confusão, o piloto apontou que um cenário semelhante em fase de simulador poderia contribuir para melhor compressão do modo "*Approach Phase*" e das possibilidades de seu uso em voo real.

Os instrutores entrevistados reportaram algumas situações não citadas pelos alunos. A saber, no caso específico do ATR, o esquecimento de avançar as manetes de potência para configurar a retomada de uma subida a partir de um voo nivelado. Esse episódio se deve ao fato de que ao comandar a subida em uma aeronave com gerenciamento automático de tração, as manetes avançam sem intervenção mecânica do piloto (autothrottle do E195) ou a potência é aumentada sem mudança de posição das manetes (autothrust do A320).

Já os pilotos que migram do ATR para as outras aeronaves, por vezes, esquecem de recolher o freio aerodinâmico após o término de uma descida com posterior nivelamento, a saber, muito provavelmente, pela inexistência desse recurso no turboélice.

Uma situação relatada com mais detalhes por um instrutor de ATR evidenciou

o seguinte fato: “Aluno realiza a entrada em espera, reduzindo as manetes de potên*cia para alcançar a velocidade correta. Como geralmente o aluno está preparando a aeronave para pouso, é comum esquecer o monitoramento da velocidade, às vezes levando até o pré stall.”*

O esquecimento das manetes em determinada posição remete à complacência gerada pelo automatismo dos sistemas automáticos de gerenciamento de tração das aeronaves.

O instrutor em questão apresenta como sugestão de mitigação desse evento, o conhecimento do piloto aluno das posições intermediárias do curso das manetes de potência como parâmetro para configurar a aeronave mais facilmente em diversas situações. Os pilotos também foram incentivados a apresentar sugestões. Um dos respondentes sugeriu uma sessão específica em que o instrutor cria situações de confusão entre pilotos por meio de autorizações de mudança de nível e rumo. Assim, é possível verificar a adequada distribuição de tarefas no *cockpit* entre pilotos.

Para o piloto de ATR, a ausência de TMS é o fator que mais contribui para a confusão de modo em função do aumento da carga de trabalho.

Para pilotos de E195 advindos de A320, foi destacado a maior carga de trabalho no acompanhamento das manetes durante a atuação do A/T. Especialmente no caso do E195 Geração 2 (E2), foi evidenciado diferença de sensibilidade de comandos quanto ao *feedback* de *inputs* de *pitch* em situações de saturação de comandos.

A partir da análise das informações dos respondentes do questionário, foi possível sintetizar a percepção do grupo de instrutores e pilotos em transição (alunos) em um Mapa de Respostas na Tabela 1.

Os instrutores acreditam que a continuidade da prática reduz a probabilidade de eventos de confusão por parte de seus alunos. Adicionalmente, é pertinente destacar que apenas instrutores mencionaram a importância da avaliação das consequências de alguma situação anormal e esquecimento do correto posicionamento das manetes de potência. Isso sugere que os pilotos em transição não se atentaram para tais situações.

Elementos citados que contribuem negativamente para aprendizado	Número de menções	
	Instrutores	Pilotos em Transição
Fadiga/Escala de voo/escala de trabalho	3	6
Filosofia do fabricante da nova aeronave	2	6
Quantidade de horas de treinamento insuficiente (em simulador ou rota)	2	3
Material disponibilizado para treinamento insuficiente	1	1
Intervalo curto entre sessões de treinamento em simulador	3	3
Intervalo longo entre sessões de treinamento em simulador	3	2
Gerenciamento de navegação vertical	4	6
Gerenciamento de energia da aeronave	4	5
Interpretação dos modos apresentados no FMA da aeronave	3	7
Identificação das posições (*detents*) das manetes de potência	1	4
Sequência de ações no *cockpit* durante arremetida	5	6
Gerenciamento de situações de alguma pane e suas consequências	2	0
Esquecimento de usar manete de potência em momento apropriado	5	0

Tabela 1 – Mapa de Respostas.

5.2 Proposta de Modelo de Treinamento

A Figura 11 sintetiza os novos elementos a serem desenvolvidos no presente trabalho e inseridos no Processo de Regulação e Treinamento de Pilotos, com vistas ao desenvolvimento do Modelo Conceitual de Treinamento proposto.

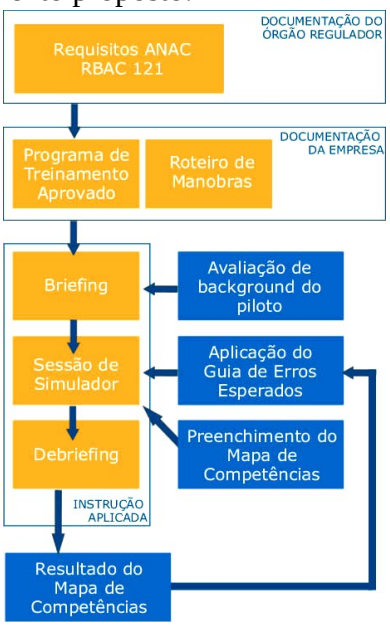


Figura 11 – Modelo Conceitual de Treinamento.

Conforme ilustrado, a investigação por parte do instrutor da aeronave pregressa do aluno será levada em consideração a fim de destacar as situações mais propícias de confusão para ele. Com isso, o instrutor inicia o *briefing* questionando qual foi a última aeronave voada pelo seu aluno a fim de buscar as melhores associações para a aeronave em treinamento. Isso pode tornar a transição mais amigável e destacar quais

pontos devem ser reaprendidos e esquecidos da aeronave anterior.

O próximo passo é a aplicação durante a sessão do Guia de Erros Esperados, que tem como fonte as informações colhidas nos questionários (aplicados a instrutores e alunos em transição). Por fim, o Mapa de Competências é uma ficha de avaliação com graus de cumprimento de cada tarefa seguindo o modelo taxonômico de domínio cognitivo de Bloom (FAA, 2020).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo objetivou atentar para as confusões apresentadas por pilotos de linha aérea. Os questionários foram respondidos por pilotos de uma mesma empresa aérea, o que torna os resultados e conclusões muito direcionados. Apesar da aeronave Boeing 737 representar uma quantidade significativa dentro da frota brasileira de aeronaves comerciais, tal modelo não faz parte da análise, pois o objeto desse estudo atende às questões dada a diferença entre os três fabricantes escolhidos podendo ser estendida a modelos de outras empresas. Por outro lado, o referido estudo poderá ser expandido para trabalhos futuros, com outros modelos de aeronaves, incluindo aviação geral e executiva.

Ao término da apreciação das respostas dos questionários, foi percebido que algumas perguntas devem ser mais enfáticas quanto ao automatismo em si. Por vezes, as respostas foram associadas a confusão de momento de comandar determinadas ações de *cockpit* dada a diferença entre cada modelo de aeronave. Um exemplo dessa situação foi o relato em que o piloto confundiu o momento correto de solicitar o trem de pouso.

REFERÊNCIAS

ANAC. RBAC 121. Agência Nacional de Aviação Civil. [S.l.]. 2021.

BANDEIRA, M. C. G. S. P.; CORREIA, A. R.; MARTINS, M. R. General model analysis of aeronautical accidents involving human and organizational factors. Journal of Air Transport Management, 69(C):137-146, 2018.

BILLINGS, Charles E. Human-centered aviation automation: Principles and guidelines. 1996.

BUTLER, Ricky W. et al. A formal methods approach to the analysis of mode confusion. In: 17th DASC. AIAA/IEEE/SAE. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. Nº. 98CH36267). IEEE, p. C41/1. 1998.

CALDWELL, J.A.. Fatigue in aviation. Travel Med. Infect. Dis. 3 (2), 85–96, 2005.

CHOW, Stephanie; YORTSOS, Stephen; MESHKATI, Najmedin. Asiana Airlines Flight 214: Investigating cockpit automation and culture issues in aviation safety. Aviation Psychology and Applied Human Factors, v. 4, n. 2, p. 113, 2014.

FAA. Aviation Instructor's Handbook. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. U. S. Department of Transportation, 2020.

GORMAN, M. K., HENDEL, E., MIKUTEL, D., HERRON, R. I., KANN, D. Learning from Asiana 214-Minimizing Strike/Rollover for Aircraft Rescue and Firefighting. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 5(5), 2018.

KHAROUFAH, H. et al. A review of human factors causations in commercial air transport accidents and incidents: From to 2000–2016. Progress in Aerospace Sciences, v. 99, p. 1-13, 2018.

LYU, H.; NANDIGANAHALLI, J. S.; HWANG, I. Automation intent inference using the GFHMM for flight deck mode confusion detection. Journal of Aerospace Information Systems, v. 15, n. 3, p. 172-177, 2018.

MARTINUSSEN, M.; HUNTER, D. R. Aviation psychology and human factors. CRC Press, p. 277-312, 2017.

MOULOUA, M.; HANCOCK, P.; JONES, L.; VICENZI, D. Automation in Aviation Systems: Issues and Considerations. In: WISE, J. A.; HOPKIN, V. D.; GARLAND, D. J. Handbook of Aviation Human Factors. 2ª. ed. Boca Raton: CRC Press, Cap. 8, p. 1-8, 2010.

NTSB – National Transportation Safety Board. (2014, June 24). Descent below visual glidepath and impact with seawall – Asiana Airlines flight 214.

PARASURAMAN, R., Sheridan, T.; Wickens, C. A model for types and levels of human interaction with automation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part A: Systems and Humans, 30(3), 286–297, 2000.

REASON, James. Human error. Cambridge university press, 1990.

ROSE, A. M. “Acquisition and retention of skills,” in Application of Human Performance Models to System Design, G. McMillan, Ed. New York: Plenum, 1989.

SCERBO, M. W. Theoretical perspectives on adaptive automation. In R. Parasuraman; M. Mouloua (Eds.), Automation and human performance: Theory and applications (pp. 37–63). Mahwah, NJ: Erlbaum, 1996.

SILVA, S. S.; HANSMAN, R. J. Divergence between flight crew mental model and aircraft system state in auto-throttle mode confusion accident and incident cases. Journal of cognitive engineering and decision making, v. 9, n. 4, p. 312-328, 2015.

SMALL, A. Human factors analysis and classification system (HFACS): As applied to Asiana Airlines flight 214. Journal of Purdue Undergraduate Research, 10, 69–77, 2020.

TARNOWSKI, E.; SPEYER, J. J. Integrating Human Factors and Automation with Progress in Aircraft Design and Flight Management. Aviation Safety, p. 169-188, 2020.

REAL-TIME MONITORING AND ALERTING OF GO-AROUNDS: OPERATIONAL IMPACTS ASSESSMENT THROUGH HUMAN-IN-THE-LOOP SIMULATION

Celso Luís do Couto Figueiredo, Mayara Condé Rocha Murça and José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

*** Corresponding author e-mail address**: celsofigueiredo.atc@gmail.com, mayara@ita.br, eng.fregnani@hotmail.com.

PAPER ID: SIT2206

ABSTRACT

A go-around is a relevant safety event that may occur during the approach phase of the flight due to several reasons such as unstable approach, loss of separation or adverse weather. In dense terminal areas, this maneuver can generate significant additional Air Traffic Control (ATC) workload as it requires a quick and accurate reaction to reintegrate the flight into the traffic flow and immediately establishing a new approach and landing sequence. In current operations, air traffic controllers typically become aware of a go-around during or after their execution, which leads to a very short time horizon for decision-making. This research aims to evaluate the operational impacts of a real-time monitoring and alerting solution for ATC decision support in approach control facilities and aerodrome control towers. Based on a human-in-the-loop simulation of air traffic operations at the Sao Paulo/Guarulhos International Airport, one assesses how the presence of an alert that anticipates the occurrence of a go-around affects the ATC performance. The results showed an increase in the perceived levels of situation awareness and safety as well as an increase in the efficiency of ATC decisions concerning the go-around, with an observed reduction of nearly two minutes in the flight time from the start of the maneuver and the landing when the alert was active..

Keywords: air traffic control, decision support, machine learning, situation awareness.

1. INTRODUCTION

Approach and landing are the most critical phases of the flight. The high density of operations, the navigation complexity, the number of aircraft configuration changes and the dynamics of weather conditions create a complex environment that places significant workload on both the flight crew and Air Traffic Control (ATC), with a higher likelihood of unanticipated events that can lead to unsafe or inefficient operations. For instance, between 2013 and 2022, the approach and landing phases accounted for 39% of the accidents worldwide (ICAO, 2023).

Unanticipated events such as go-arounds are one of the main contributors for reducing the safety and efficiency levels during the approach. A go-around is a missed approach maneuver that may be initiated by the pilot or ATC for various reasons, such as unstable approach, loss of separation, or adverse weather. Upon the occurrence of a go-around, controllers typically have very short time horizon for decision-making. From the Aerodrome Control Tower (TWR) perspective, ATC instructions must be issued immediately to the pilot to avoid loss of separation between the aircraft performing a go-around and other aircraft departing or approaching. At the same time, an effective coordination procedure with the Approach Control (APP) must be performed by the TWR to inform that an aircraft executed a go-around and start the transfer of control and communication. APP controllers then must quickly issue ATC instructions to reintegrate the aircraft into the approach sequence while maintaining a safe and expeditious traffic flow. Currently, these actions are performed reactively after the go-around is initiated based on information relayed through voice communication.

With the on-going aviation system's digital transformation, several opportunities have arisen to develop novel real-time monitoring and alerting tools to enable more proactive, safe and efficient decision-making. Several initiatives are concentrated on flight crew operations. An example is the Runway Overrun Prevention System (ROPS+), an on-board cockpit technology designed to reduce exposure to runway excursion risk (AIRBUS, 2018). It continuously monitors total aircraft energy and anticipates the landing performance in wet or dry conditions, aiming to increase pilots' situational awareness during landing. Despite the existence of several studies describing that situation awareness is crucial for the successful performance of decision makers in aviation (ENDSLEY *et al.*, 2018), there is a lack of monitoring and alerting tools in support of ATC operations, especially during abnormal conditions.

Recent research has explored the use of increasingly available operational data and machine learning techniques towards the development of real-time monitoring tools for enhanced decision-making in the Air Traffic Management (ATM) context. A particular emphasis has been placed on the detection of anomalies in flight operations data, as anomalies are often related to critical safety events or inefficient operations. Specifically focused on the approach phase, Coelho and Murça (2023) proposed novel online anomaly detection models for anticipating the occurrence of a go-around based on streaming surveillance data. The models provide the basis for real-time monitoring of approach trajectories and alerting of go-around events towards supporting ATC decisions during these events. **Figure 1** illustrates a hypothetical alert message of a potential go-around displayed on the Human Machine Interface (HMI) of an ATC surveillance system.

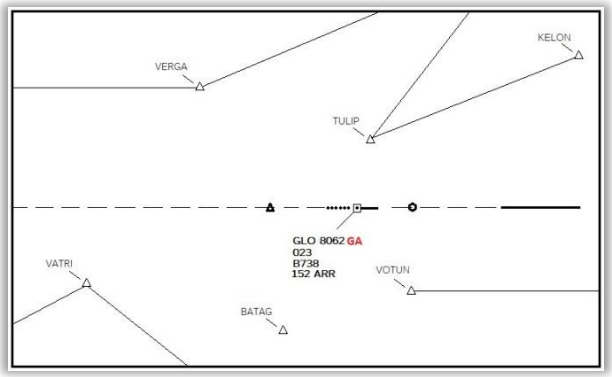


Figure 1 – Hypothetical go-around (GA) alert message displayed on the HMI of an ATC surveillance system.

In this research, the operational impacts of such a real-time monitoring and alerting solution are investigated. Based on a human-

in-the-loop (HITL) simulation, we analyze how the ATC performance, actual and perceived, is affected in the presence of a hypothetical tool that monitors the approach trajectories and anticipates the occurrence of a go-around event.

2. LITERATURE REVIEW

There has been substantial research dedicated to aviation data analytics for the development of novel post-event analysis and decision support capabilities (CHUNG, 2020). Anomaly detection initiatives have been extensively explored for proactive safety management in airline operations based on Flight Data Recorder (FDR) data (LI *et al.*, 2011) and Flight Operational Quality Assurance (FOQA) data (GORINEVSKY *et al.*, 2012), for example. On the other hand, from the Air Traffic Management (ATM) operations perspective, a few studies have explored the problem of anomaly detection on flight tracking data, being mostly focused on offline anomaly detection for post-event air traffic performance analysis (MATTHEWS *et al.*, 2013; MURÇA *et al.*, 2016; OLIVE *et al.*, 2019; BONIFAZI *et al.*, 2021).

More recently, the challenge of online anomaly detection from streaming flight operations data has been explored in the literature. Deshmukh *et al.* (2019) applied a supervised learning algorithm to detect precursors for flight anomalies in the terminal airspace from surveillance data. They applied the data-driven models to identify precursors of go-around and S-turn anomalies in the terminal airspace around LaGuardia Airport (LGA) based on a look-ahead time of approximately ten seconds. Coelho and Murça (2023) developed machine learning-based models to predict the occurrence of go-arounds based on surveillance and meteorological data. They applied the models for monitoring approach operations at the Sao Paulo/Guarulhos International Airport (GRU), being able to predict 78% of the go-around maneuvers correctly as early as 50 seconds from the runway.

These studies have shown great potential for the use of flight operations data and machine learning techniques to develop predictive models that can be applied in online settings for real-time monitoring and alerting of significant anomalous events. However, the actual impacts for ATC decision-making are not explored. In this study, we evaluate the actual operational impacts of such a real-time monitoring and alert solution. Through a realistic human-in-the-loop simulation of air traffic operations, we analyze how the presence of an alert that anticipates the occurrent of a go-around event affects ATC decision-making and performance.

3. METHODOLOGY

A HITL simulation was conducted to evaluate the operational impacts of a real-time monitoring and alert solution for go-around events. The simulation was carried out at the ATC Simulation Laboratory (LABSIM) of *Instituto de Controle do Espaço Aéreo* (ICEA), shown in **Figure 2**. LABSIM is the main facility used for recurrent training of air traffic controllers for the Brazilian Airspace Control System (SISCEAB). The ATC radar simulators at LABSIM provide a very realistic operational environment that allows the controllers to perform their tasks as if they were in the actual ATC facility.

Figure 2 – LABSIM premises where the HITL simulation was conducted.

The operational environment simulated was the Sao Paulo APP, the ATC facility responsible for the provision of air traffic services to departing and arriving traffic in the Sao Paulo Terminal Maneuvering Area (TMA-SP), and the TWR of Sao Paulo/Guarulhos

International Airport (GRU), the ATC facility responsible for managing the airport landings and takeoffs. Three working positions were monitored throughout the simulation: the final approach sector controller (APP FIN), the feeder sector controller (APP FEED) and the local controller (TWR) for GRU.

Four traffic scenarios for the TMA-SP and four teams of controllers were selected for the simulation. The selected scenarios, extracted from the Sao Paulo APP training portfolio, were those having a high level of complexity and workload to explore the most of the controllers' reactivity in the face of dense traffic in the sectors. Each scenario was run twice. In the second run, the difference was the presence of a GA alert for approaches at GRU. A vocal instruction was used to simulate the GA alert for the APP and TWR controllers. For each scenario, a set of randomly selected flights were programmed to initiate a go-around at a fixed altitude of 1,600 ft. For each scenario run that considered the presence of a GA alert for approaches, the alert was issued at 2,000 ft. These fixed altitudes were selected based on observed performance for the simulator. The simulation scheme is summarized in **Figure 3**.

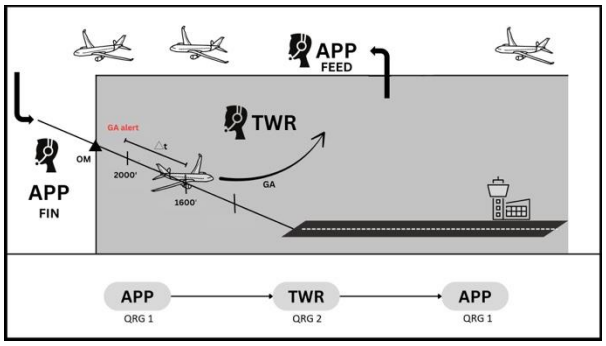


Figure 3 – Simulation scheme.

During the real-time simulation, a group of observers was responsible for collecting data regarding the timing of relevant flight events and ATC tasks to enable the quantitative assessment of operational performance. **Table 1** describes the quantitative metrics computed for each simulation scenario run.

Table 1 – Quantitative metrics computed for each HITL simulation scenario run.

Metric	Description
M1	Elapsed time (in seconds) between the start of the go-around maneuver and the first ATC instruction issued by the TWR controller to the flight
M2	Elapsed time (in seconds) between the start of the go-around maneuver and the first ATC instruction issued by the APP controller to the flight
M3	Elapsed time (in seconds) between the start of the go-around maneuver and the landing of the flight

Finally, at the end of the simulation, the controllers were asked to fill in a questionnaire about the perceived utility and operational impacts of the proposed real-time monitoring and alerting tool. The questionnaire was composed of multiple-choice questions, except for one open question at the end aimed at collecting general comments and observations. The objective questions were designed using the Likert scale (LIKERT, 1932) to measure the degree of agreement of the respondent with respect to the statement proposed.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Based on the data collected during the HITL simulation, the quantitative metrics listed in **Table 1** were computed. The results are displayed in Figures 4-6. **Figure 4** shows the average elapsed time between the start of the go-around maneuver and the first ATC instruction issued by the TWR controller for each traffic scenario simulated without and with the GA alert. On average, we observed a reduction of 3.5s on the time required for a positive reaction by the TWR controller in the presence of the GA alert. The reaction time may be understood as the time required for the controller to issue the first ATC instruction regarding the missed approach, such as the level to which the aircraft is to climb and heading instructions to keep the aircraft within

the missed approach area and maintain the required safety separations. The results show that, with the GA alert, the TWR controller was able to issue ATC instructions concerning the missed approach more quickly.

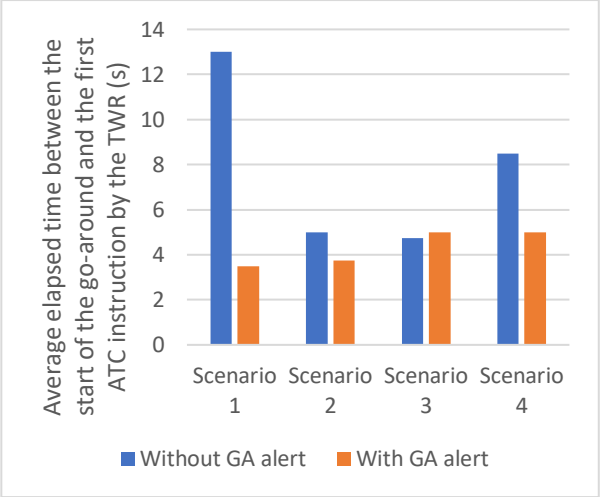


Figure 4 – Impacts of the GA alert on the TWR reaction time.

A similar behavior was observed for the APP controller. **Figure 5** shows the average elapsed time between the start of the go-around maneuver and the first ATC instruction issued by the APP FEED controller for each traffic scenario simulated without and with the GA alert. On average, a reduction of 8.2s was observed on the time required for a positive reaction by the APP controller in the presence of the GA alert. This suggests that the controller was able to plan, in advance, the actions to reintegrate the flight in the approach sequence, issuing more quickly the ATC instructions to accomplish the task. Interestingly, the results of the simulation showed that such opportunity for planning in advance resulted in more efficient decision-making. **Figure 6** displays the average elapsed time between the start of the go-around maneuver and the landing of the aircraft. On average, we observed a reduction of 141.6s in the flight time from the start of the go-around until the landing of the aircraft when the GA alert was active. These results emphasize the importance of ATC decision support tools to increase the efficiency and the environmental performance of the air traffic.

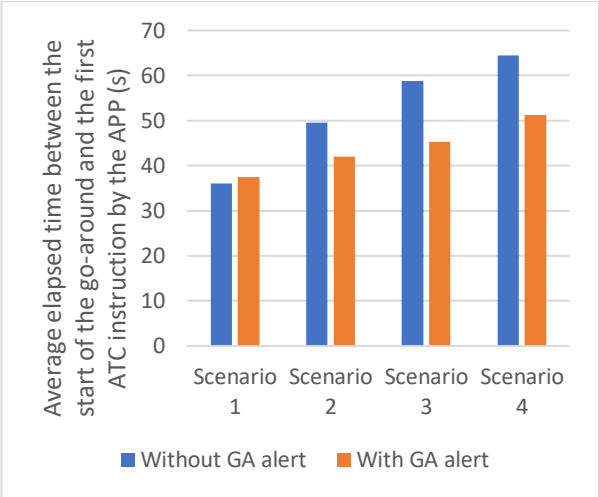


Figure 5 – Impacts of the GA alert on the APP reaction time.

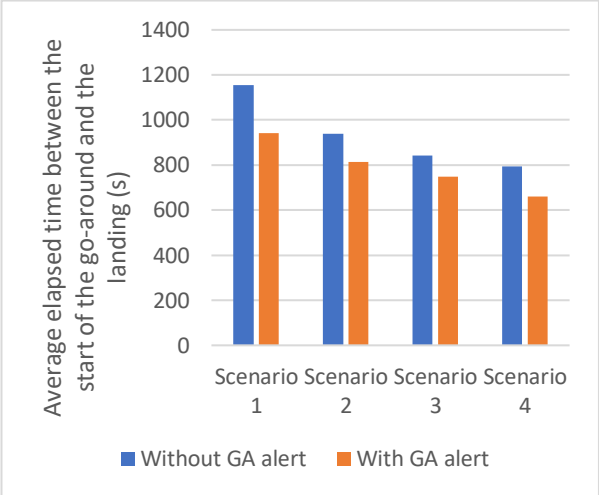


Figure 6 – Impacts of the GA alert on the flight time from the start of the go-around until landing.

Besides the quantitative assessment of operational performance, a subjective evaluation regarding the perceived impacts of the proposed monitoring and alerting tool was carried out. Figures 7-9 presents the results of the questionnaire applied to controllers after the end of the simulation.

First, the controllers were asked to compare the perceived levels of situation awareness, workload, and safety during the HITL simulation runs with and without the presence of the GA alert. **Figure 7** shows that 100% of the controllers considered that the GA alert increased the situation awareness during the go-around events, with some indicating that the perceived level of situation awareness was

much higher than usual. This very expressive percentage is a potential explanatory factor for the observed reductions in controller reaction time shown in Figures 4-5, as situation awareness is critical for fast and efficient decision-making.

Most of the air traffic controllers (57%) considered that the workload was about the same as usual with the proposed alerting capability. This is a relevant result, as ATC is a high-workload activity that ultimately determines airspace capacity. Therefore, the introduction of any novel automation tool should carefully consider the impacts on controller workload.

In terms of safety, an expressive percentage of 57% of the controllers found that the presence of the GA alert generated a positive impact, with the remaining 43% indicating that the safety level was about the same as usual. As the approach and landing phase accounts for the highest share of accidents worldwide, the positive impact perceived by most controllers emphasizes the potential contribution of the proposed tool to enhance the overall flight safety.

Next, the controllers were asked to assess potential changes in operational performance with the GA alert. **Figure 8** shows that 100% of the controllers agreed that the alert facilitated the reintegration of the traffic in the approach sequence and 71% agreed that traffic flow efficiency increased. These results corroborate the observed reduction in flight time shown in Figure 6, highlighting the potential benefits of the proposed tool in terms of efficiency besides safety. Regarding the coordination process between the TWR and the APP, controller perception varied. 43% of the controllers disagreed with the statement that the GA alert facilitated the coordination. This result might be related with the fact that the GA alert was present for both the TWR and the APP controller, potentially affecting the form of coordination and the overall perception of its need.

Figure 8 also shows that the alert performance is a very important aspect to be considered for practical implementation. A small percentage of the controllers (14%) considered that the alert timing could be more appropriate. Moreover, 43% of the controllers indicated that alert failures would be unacceptable. These results emphasize the importance of the reliability and the antecedence of the information provided by the tool. Since the accuracy of predictive models is affected by the prediction horizon (DESHMUKH *et al.*, 2019; COELHO and MURÇA, 2023), a trade-off will exist between different alert performance requirements. Therefore, the operational impacts of different levels of alert performance, based on the actual performance of state-of-the-art predictive models, should be analyzed in future studies.

Finally, the controllers evaluated the utility of the GA alert for different ATC tasks. **Figure 9** shows that the totality of the controllers considered that the alert was useful for clearance provision tasks, with 57% of the controllers attributing a medium utility score and 43% a high utility score. A very high percentage of 86% of the controllers also found that the alert was useful for conflict resolution tasks. On the other hand, the perception of the controllers about the utility of the alert for coordination tasks varied from low to high, which is in line with the results shown in **Figure 8**. Overall, there was a positive perception about the global utility of the GA alert, with 57% of the controllers attributing a medium utility score and 43% a high utility score.

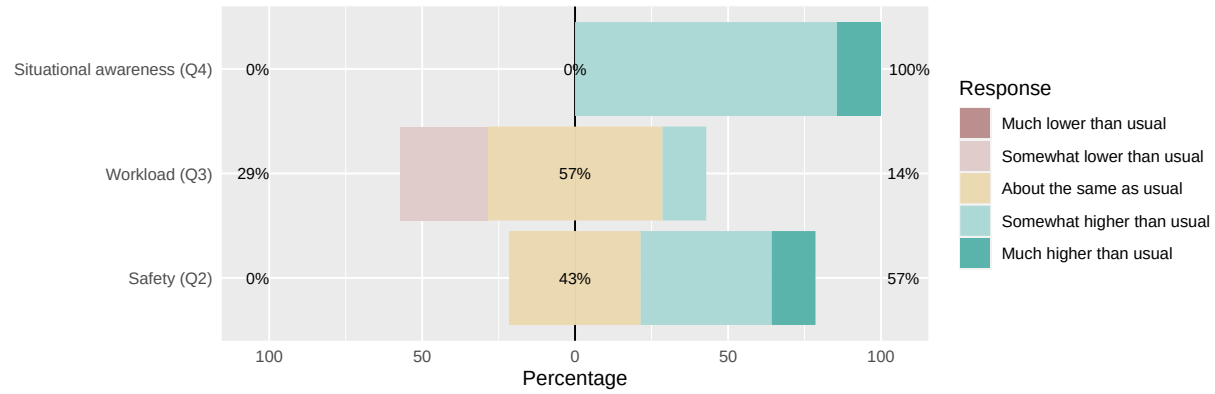


Figure 7 – Perceived impacts of the GA alert on situation awareness, workload, and safety.

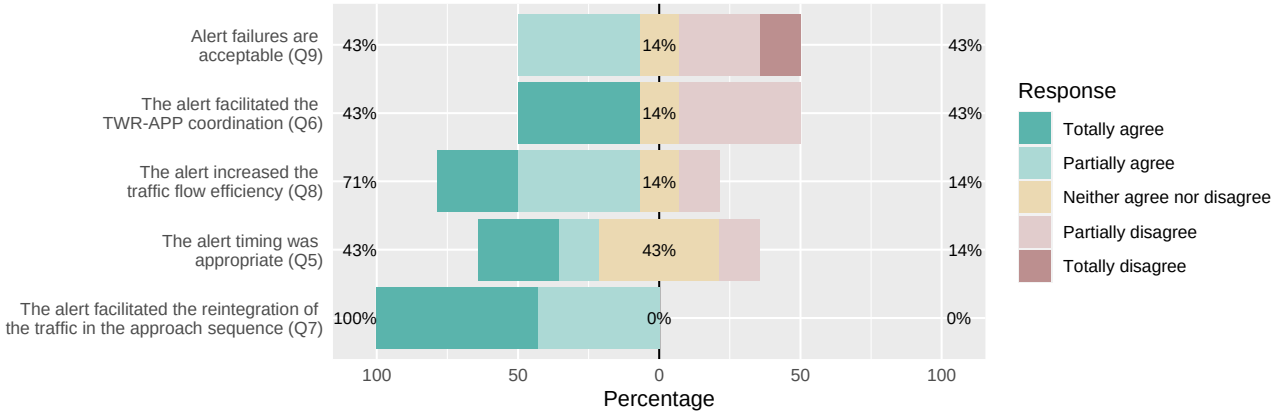


Figure 8 – Perceived operational performance with the GA alert.

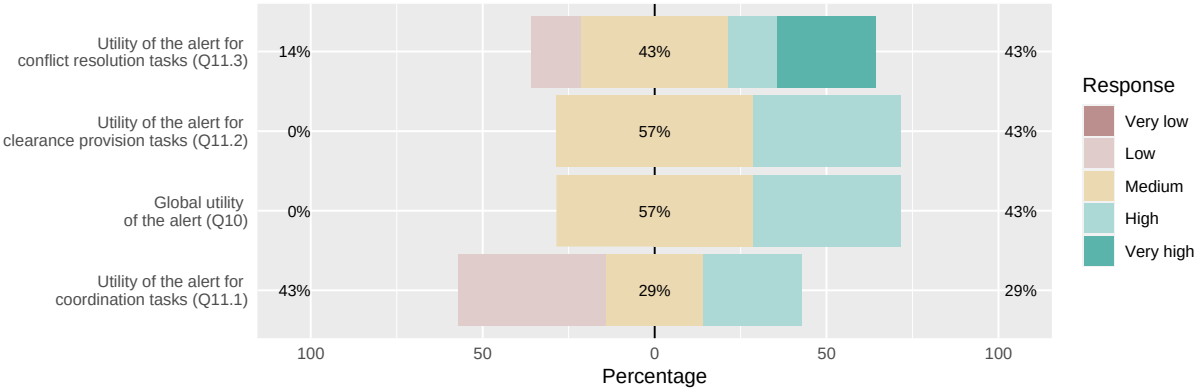


Figure 9 – Perceived utility of the GA alert for ATC tasks.

5. CONCLUSIONS

This research evaluated the operational impacts of a real-time monitoring and alerting solution that anticipates the occurrence of a go-around event towards Air Traffic Control (ATC) decision support in approach control facilities and aerodrome control towers. The evaluation was performed with a human-in-the-loop (HITL) simulation of air traffic operations at Sao Paulo/Guarulhos International Airport. The simulation was based on four traffic scenarios that were run with and without the presence of a go-around alert for air traffic controllers during the approach.

The results showed an increase in the perceived levels of situation awareness and safety as well as an increase in the efficiency of actual ATC decisions concerning the go-around. Overall, we observed a reduction of nearly two minutes in the flight time from the start of the go-around and the landing when the alert was active. This reduction in flight time can be directly associated with the improvement in the perceived level of situation awareness due to information received in advance.

The operational performance metrics computed after the HITL simulation associated with the subjective evaluation results acquired with the questionnaires distributed to the controllers who participated in the simulation indicated that the proposed tool has a great potential to support ATC decision-making in real-time during go-around events, delivering an important contribution towards safer and more efficient flight operations.

One important aspect revealed by the questionnaire responses is that the potential occurrence of alert failures might not be easily handled by the controllers. In future studies, additional simulation experiments could be performed to evaluate how the predictive performance of such a decision support tool impacts the usability of the tool and the overall operational performance.

6. REFERENCES

AIRBUS/NAVBLUE. (2018) Runway Overrun Prevention System (ROPS+). An active safety net for runway overruns. Available in: <https://www.navblue.aero/product/rops-plus/>. Access in: 14 May 2022.

Bonifazi, A.; Sun, J.; van Baren, Gerben; Hoekstra, J.M. (2021) Modeling and Detecting Anomalous Safety Events in Approach Flights Using ADS-B Data. https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/105023158/ATM_Seminar_2021_paper_69.pdf

Chung, SH; Ma, HL; Hansen, M; Choi, TM. (2020) Data science and analytics in aviation. https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101837.

Coelho, L, S; Murça M. C. R. (2023) Machine Learning Models for Online Anomaly Detection in Flight Operations, DOI:10.2514/6.2023-4107.

Deshmukh, R and Hwang, I. (2019) Anomaly Detection Using Temporal Logic Based Learning for Terminal Airspace Operations. AIAA 2019-0682. Session: Intelligent Systems Student Paper Competition. https://doi.org/10.2514/6.2019-0682.

Endsley, M.R. and Jones, W.M. A Model of Inter and Intra-Team Situation Awareness: Implications for Design, Training and Measurement. (2001) New Trends in Cooperative Activities: Understanding System Dynamics in Complex Environments. https://www.researchgate.net/publication/285745823

Gorinevsky, D., Matthews, B. & Martin, R. (2012) Aircraft anomaly detection using performance models trained on fleet data. Conference on Intelligent Data Understanding', IEEE, Boulder, CO, USA, pp. 17–23. 2012. DOI: 10.1109/CIDU.2012.6382196

ICAO, International Civil Aviation Organization, Portal iSTARS, Accident Statistics. https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Accident-Statistics.aspx. Access in: 13 September 2023.

Lai, HY; Chen, CH and Khoo, LP. (2017) Unstable Approach: Intervention and Prevention. Nanyang Technological University, Singapore. 2017. doi:10.3233/978-1-61499-779-5-29.

Li, L; Gariel, M; R. John Hansman; Palacios, R. (2011) Anomaly detection in onboard-recorded flight data using cluster analysis. DOI: 10.1109/DASC.2011.6096068

Likert, R. (1932) A technique for the measurement of attitudes. Archives of Psychology, 22 140, 55. Available in: <https://psycnet.apa.org/record/1933-01885-001>

Matthews, B.; DAS, S.; Bhaduri, K., DAS, K. (2013) Discovering Anomalous Aviation Safety Events Using Scalable Data Mining Algorithms. Journal of Aerospace Computing, Information and Communication 10(10):467-475. DOI:10.2514/1.I010080

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. In: 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Los Angeles, CA, http://dx.doi.org/10.2514/6.2013-4386, URL: http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2013-4386.

Murça, M.C.R.; Delaura, R.; Hansman, R.J., BALAKRISHNAN, H. (2016) Trajectory Clustering and Classification for Characterization of Air Traffic Flows. https://doi.org/10.2514/6.2016-3760.

Olive, X; Basora, L. (2019) Identifying Anomalies in past en-route Trajectories with Clustering and Anomaly Detection Methods. HAL Id: hal-02345597. Available in: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02345597/document>

SAFETY ASPECTS FOR THE DESIGN OF AUTOMATIC CONFLICT RESOLUTION IN TCAS

Maurício Spiazzi Richter*, José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani†, Donizeti de Andrade§

* Divisão de Engenharia Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, mauriciosrichter@gmail.com
† Divisão de Engenharia Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, eng.fregnani@hotmail.com
§ Divisão de Engenharia Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ddadonizeti@gmail.com

PAPER ID: SIT2289

ABSTRACT

There is an increasing level of automation present in every new generation of aircraft cockpits. This paper focuses the analysis on the automation of conflict resolution in traffic alert and collision avoidance systems (TCAS), bringing a discussion about the human factors related to the interaction of pilots with such systems, as well as the role-sharing between them. Grounding the discussion on relevant prior research on that topic and presenting the existing risks involving mid-air collision and in-flight loss of control, impacts in aviation safety are also evaluated, including the potential positive and negative outcomes of this extra assistance. With that, this work draws attention to the most important concerns when designing this kind of systems, in order to enhance the benefits and mitigate the side-effects aiming a development that correctly takes into account the human behavior when dealing with automated systems.

Keywords: Automatic RA; TCAS; Aircraft automation; Human factors; Aviation safety.

1. INTRODUCTION

It is no surprise that automation adds complexity in the design and operation of aircraft systems. A more challenging part, though, is to understand the specific characteristics of this complexity and propose solutions that are successful in dealing both with the functional side and performance as well as with the human side. From the transformation of input data into useful information to the automation of problems' handling in a variety of systems, this becomes even more critical to airworthiness when dealing with automated systems that are able to take control of the aircraft, as it is the case with autopilot systems, for example.

The research topic involving human factors related to systems' automation has been addressed throughout the years by authors such as Parasuraman & Riley (1997), who have analyzed several characteristics of the human-automation interaction, and Billings (1997), Ferris, Sarter, & Wickens (2010), who worked on the principles to guide the development of cockpit automation while having the human engagement as the central part of this development. Supporting human-machine analysis and design, classification of automation levels have been proposed by Save & Feuerberg (2012), on top of previous works such as (Parasuraman & Sheridan, 2000).

Closely related to that, the approach to understand accidents involving human contribution has been in constant evolution, emphasizing a more systematic analysis (Dekker, 2014) that accounts for the distribution of the cognitive processes across the human and the automated systems (De Boer & Dekker, 2017).

This research focuses on analyzing the automation of the conflict resolution stage of TCAS, *i.e.*, automatic compliance to RAs. Studies regarding tests of pilots' responses to advisories Chappell (1990) and rates of pilot compliance to TCAS RA in simulation (Pritchett & Fleming, 2013) and operational environment (Eurocontrol, 2022), as well as experiments' analysis stressing the auto-RA capability in different conflict scenarios (Pritchett, Haga, & Li, 2016), were used as the basis to evaluate the multifactorial environment in which the systems can be introduced and draw some conclusions on the most relevant impacts on safety of flight that such systems can have.

The type of accident intended to be avoided by the usage of collision avoidance systems is the mid-air collision (MAC). However, it is also important to understand the potential threats of automation contributing, for example, to loss of control in-flight (LOC-I). To address that, definitions from the International Civil Aviation Organization (ICAO, 2019) and accidents or near accidents data are brought to bring light to the discussion.

As a main objective, therefore, the present work intends to provide guidelines for the design of RA compliance automation on TCAS through recommendations that focus on the related human factors, based on a discussion that evaluates the impact of such systems on the safety of flight.

2. SETTING THE BASELINE

Automation evolution throughout the years has come with a progressive concern about the interaction of humans with systems using it. The more today's cockpits rely on automated functions providing information or actuating directly on the aircraft, the more research topics are raised to address design strategies to build safer and more efficient systems.

Parasuraman & Riley (1997), for example, contributed with a detailed analysis on how well-established ergonomics design principles can be employed to avoid misusage of automated systems and how a high-workload environment can deteriorate this interaction. The potential abuse of automation by developers and operators and the opposite situation of disuse were also investigated by the authors, stressing different expectations between designers, managers and operators for complex systems cannot be neglected and that an imbalance on that, such as operators not being actively involved in the decision of implementing an automated function often results in unanticipated problems.

Corroborating the concern with systems' complexity, Javaux (1998) analyzed cognitive aspects that build a gap between pilot's mental models of, for example, modal systems'

behavior, which is a simplified set of rules, and the actual human-automation interface in place. Still related to the high systems' complexity and coupling with other systems, Billings (1997) highlighted that for operators to be able to monitor automation, it requires predictability from the system. This is not something trivial when dealing with complex systems and is certainly something that needs to be considered during design to define not only the behavior but how information will be outputted. Of course, it also needs the operator to have adequate knowledge about the system and sufficient training.

Ferris, Sarter & Wickens (2010) synthetize some of these principles related to cockpit automation, combining with the analysis of lack of observability in automated systems and how to counteract it, to the illustration of lack of standardization between systems and their ever growing flexibility and complexity, and how it can be overcome by design or training.

To deal with all these intricate characteristics, Parasuraman & Sheridan (2000) have set up levels to classify automation for four generic functions, providing with this model a more complete and objective framework to examine design issues. The authors' model has been further improved by Save & Feuerberg (2012), who kept the four generic functions but developed a specific set of automation levels for each one, adapted to cover more precisely their individual aspects.

On the topic of human contribution to accidents, Dekker (2014) uses the concept of local rationality – assuming people do things that are reasonable based on their limited knowledge and perspective – to build up a sequence of steps to analyze their actions avoiding the hindsight. From a systematic approach that focuses on understanding the underlying reasons behind human actions, development of automated systems can benefit of human factors knowledge, anticipating and mitigating problems that can be created embedded to the system during the design.

Also, while analyzing que automated capabilities of a system or of an entire cockpit, much can be learned about automation complacency and bias from Parasuraman & Manzey (2010), pondering attentional factors while evaluating operational scenarios. Otherwise, De Boer & Dekker (2017) compare what they call an individual-cognition approach with a perspective focused on the effects of automation surprise and its underlying reasons, based on a distributed cognition model.

The abovementioned research, which help constituting the present knowledge supporting development and operation of important aircraft systems that humans interface with, are the foundation for the discussion presented in this work.

3. METHODS

The methodology of the paper is divided in three main stages, beginning with a literature review establishing a baseline on automation and human factors, including human-centered automation design, human factors applied to TCAS and automated conflict resolution in TCAS. Recent reports from relevant aviation institutions are also important to understand the main risks related to automation and collision avoidance.

Then, the TCAS technology is studied more deeply, understanding the mechanisms, roles and responsibilities that are involved in such systems. Data related to accidents also serve to have a more realistic scenario concerning benefits and threats of this additional automation.

From that, it is possible to develop a richer discussion over the level of automation in TCAS, human factors and impacts on aviation safety, concluding with information that can be used to develop safer systems that are able to execute their functions without posing undesirable or even unacceptable additional risks.

4. COLLISION AVOIDANCE VERSUS POTENTIAL AUTOMATION SIDE-EFFECTS

The International Air Transportation Association (IATA, 2022) states that "Mid-air Collision is an aviation accident category defined as a collision between aircraft in flight. This accident category is rare but when it occurs, it is catastrophic." The potential underlying risk explained by the high severity

makes the research and development of collision avoidance mechanisms and procedures draw so much attention. For ICAO (2011), according to the aviation occurrence categories, mid-air collision falls into the category MAC, the same one used for Airprox (air proximity), TCAS alerts, loss of separation and near mid-air collision (NMAC). Since these incidents mentioned can be considered precursors to a mid-air collision and given that actual accident data is scarce, due to the relatively low probability of happening (although with a severe impact), it is important to include these precursors (mainly NMAC) in the analysis while finding strategies to mitigate the related risks.

To illustrate the relevance of MAC prevention, ICAO (2019) classifies this type of accident as one of the High-Risk Categories (HRC) of occurrences, being one of the safety enhancement actions to "Ensure adherence to ACAS warning procedures", and EASA (2021) classifies the airborne collision as the higher risk key risk area for commercial air transport (CAT) aircraft operations and non-commercial operations with complex motor-powered aircraft (NCC), while stating as one of the actions to "Reinforce the appropriate reactions of flight crew in response to an airborne collision avoidance system (ACAS) resolution advisories (RA)".

The concern from these important actors of the aviation environment, which is based on the evaluation from groups of safety specialists, brings a relevant argument to apply a higher level of automation for TCAS resolution advisories (RA). In addition, as it has been in the past decades, the air traffic is expected to considerably grow every year, as presented in forecasts from FAA (2022) for the United States and by Eurocontrol (2022) for Europe, leading to a more crowded airspace, consequently less separation between aircraft and more complexity on its management.

By looking at data related to MAC occurrences from the Aviation Safety Reporting System (ASRS) and UK Department of Transport, the reasons for the position of the mentioned institutions regarding mid-air collision risks and prevention become clearer. Although not directly correlated with TCAS alerts, the following figures indicate the importance of continuously improving collision avoidance mechanisms.

Figure 1 shows ASRS NMAC data from 2000 to 2020, evidencing that although dropping until 2010, occurrences haven't neither kept this tendency nor have stabilized. Figure 2, on the other hand, shows AIRPROX events an increasing until 2018/2019, followed by a reduction but also not stabilizing. Note that the 2020 reduction on both graphics can be at least partially explained by the reduction in air traffic due to COVID-19 pandemic.

On both of them, however, the critical or potential events (where safety cannot be assured) follow approximately proportionally the trend of total occurrences, suggesting there is still room for improving aids that can increase safety margins. It is also possible to see that NMAC occurrences are lower in commercial air transport.

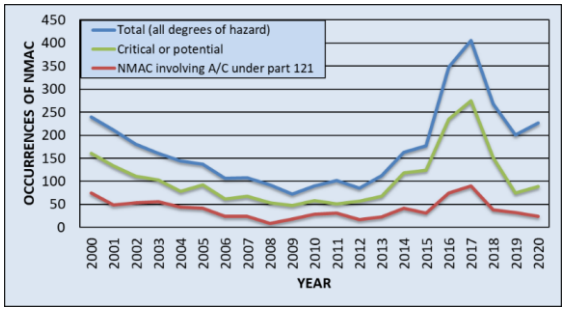


Figure 1. NMAC reporting from 2000 to 2020 in ASRS database (ASRS, 2022) – figure extracted from (Richter, 2022).

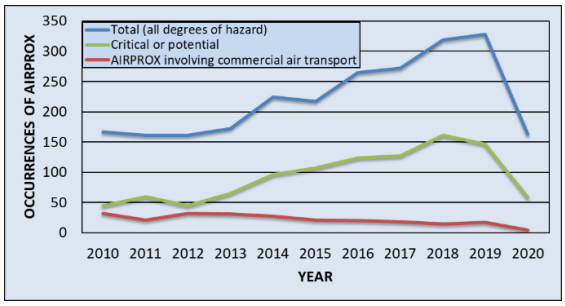


Figure 2. AIRPROX from 2010 to 2020 in the United Kingdom (UK Department for Transport, 2021) – figure extracted from (Richter, 2022).

Nevertheless, even though more automation on TCAS can serve as a mitigation for mid-air collisions on one side, there are potential side-effects related to human factors that need to be carefully taken into account. An example worth being mentioned is the cognitive overhead, which accounts for the increased mental workload related to the decision of using or not the automation

(Parasuraman & Riley, 1997). This, in critical situations such as an automatic TCAS RA, may lead to wrong decisions and cause safety to be reduced instead of reinforced. Furthermore, if human factors is not taken into account adequately, automatic TCAS RA can become an additional source of mode confusion since this is an automation that closely involves vertical AP modes coupled with speed, which according to Albano (2021) are potentially the most complex and less understood modes.

These undesired effects on pilots can lead, for example, to a loss of control in-flight (LOC-I), one of the most common types of accident with a high number of fatalities (Boeing, 2021, p. 13). This type of event is brought here considering some of the strong contributors to an aircraft upset (another classification for loss of control in-flight), as reported by EASA (2021, p. 56) in its Annual Safety Review, are "Handling of technical failures" and "Monitoring of flight parameters and automation modes", two of the most important safety issues for large aircraft.

These factors represent issues that can be related to automated functions and their interface with human behavior. In this regard, Gawron (2019) reviewed previous research on the topic, analyzing the relationship between automation characteristics and the occurrence of incidents and accidents. Items related to monitoring and vigilance, as well as improper use or poor understanding of complex systems and lack of mode awareness are likely to contribute to automation-induced accidents.

5. TCAS AND LEVELS OF AUTOMATION

Airborne Collision Avoidance Systems (ACAS) are an additional protection layer against violation of the separation minima between aircraft, independent from ground-based control, being the air traffic control (ATC) the primary layer (Kuchar & Drumm, 2007). Both of them aid the pilot who is the responsible to ensure a safe continuation of the flight, who should also apply the "see and avoid" principle for collision avoidance.

Currently, ICAO recommends through the Annex 6 *Operation of Aircraft* (ICAO, 2006) that "all aeroplanes should be equipped with an airborne collision avoidance system (ACAS II)" and "an airborne collision avoidance system shall operate in accordance with the relevant provisions of Annex 10[1]. More specifically, the installation of TCAS II is mandated by certification authorities for certain types of aircraft based on weight and number of passengers.

It is also relevant to mention that important characteristics and guidelines for certification for TCAS are given by FAA through Advisory Circular (AC) 20-151C and AC 90-48D, which states that TCAS has the purpose of "alerting all pilots to the potential hazards of midair collisions and near midair collisions (NMAC), and to emphasize those basic problem areas related to the human causal factors".

A possible improvement for the system is a hybrid surveillance using ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast) data to decrease the number of active interrogations, reduce unnecessary advisories (considering more accurate information) and integrate the best available traffic data on a single display. Increased accuracy and range can enhance both situational awareness aid and airborne conflict management (Wichgers, 2015). Another new related technology that could benefit from ADS-B improvements is the ACAS X, removing current limitations in TCAS such as using a complex set of rules with limited outcomes (Kochenderfer, Holland, & Chryssanthacopoulos, 2012). Both of these technologies, when incorporated in current or new collision avoidance systems, can also serve to improve the efficiency of automated compliance functions.

Turning the attention to the automation present in TCAS, based on the automation functions classification proposed by Parasuraman & Sheridan (2000), which associated levels from 1 to 10 – lower to higher automation authority, Richter (2022) got the following results:

[1] Annex 10 *Aeronautical Telecommunications* provides technical characteristics and requirements for surveillance performance for intruders for TCAS equipment.

- *Information Acquisition*: Level 10 ‘the computer decides everything, acts autonomously, ignoring the human’;
- *Information Analysis:* Level 7 ‘executes automatically, then necessarily informs the human’ (however, internal calculations are not informed to the pilot, leading to a possible ambiguity on this classification);
- *Decision Selection:* Level 7 ‘executes automatically, then necessarily informs the human’ (With the focus only on TCAS aid);
- *Action Implementation:* Level 4 ‘suggests one alternative’ (without auto-RA). When dealing with the Airbus TCAS AP/FD Mode, for example, with auto-RA if the autopilot is engaged, Level 6 ‘allows the human a restricted time to veto before automatic execution’.

This scale, though, has some limitation to describe a system that has a combination of a highly automated decision and action selection with a relatively low automation in action implementation (Save & Feuerberg, 2012). With that, as previously mentioned the authors have proposed a new classification, LOAT. As a result, in the *Decision Selection* and *Action Implementation* generic functions are the differences in their level of automation: whereas in the *Decision Selection* both are classified as ‘Low-Level Automatic’, adding the auto-RA implies passing the *Action Implementation* level from ‘Step-by step Action Support’ to ‘Medium-Level Automation of Action Sequence Execution’.

There is an important aspect of the TCAS to which the effectiveness of both the design and operation are subject to: pilot compliance. Chappell (1990) carried out three studies to test pilots’ responses, evaluating adequate aircraft separation with and without the aid of TCAS II. This work has helped the beginning of TCAS II implementation at a critical time by providing relevant feedback. For example, it concluded that a display containing a green target vertical speed zone in addition to the red avoidance zone leads to more accuracy. In addition, that pilots were 85% successful in strengthening maneuvers, while 15% for reversal maneuvers (Chappell, 1990).

Still regarding the compliance rates, Pritchett & Fleming (2013) observed that pilots fully complied with 68% of the RAs, for an average of 96.6% of their duration. Zooming in the analysis, they concluded that there was lower compliance to climb than to descent RAs in arrival/approach phases of flight and also that a training program significantly impacted pilots’ response in the presence of conflicting ATC guidance in relation to TCAS alerts. On the reasons for the non-compliance, the authors found out one of the main aspects was “whether the pilots achieved the commanded vertical rate within the five second response time and ¼ g pitch maneuver”, also concluding that “pilots took longer to achieve compliance when given an explicit communication suggesting controller awareness of the situation (callout or conflicting guidance) than when only partyline information was available in the background.”

On its turn, Eurocontrol (2022) confirms pilot compliance to RA brings safety benefits by increasing Vertical Miss Distances (VMDs) between conflicting aircraft. Being in-line with previous similar evaluations, the study highlights non-compliance to RAs is one of the top 5 ATM operational risk priorities. The assessment was done using radar data from the European airspace to evaluate RA compliance over 12 months, assessing mainly pilot’s reaction time (within 5 seconds), achievement of (and not exceeding) the anticipated vertical speed for RAs of 8 seconds or longer and 12 seconds or longer, and the sense of the maneuver (upward or downward as instructed by the TCAS). The results indicated a low level of compliance to TCAS RAs, particularly the climb and descend, which did not exceed 33%. Also, in more than 50% of reversal and strengthening RAs, pilots did not react as promptly and correctly as expected.

The results from the abovementioned research suggest that most of these non-compliance events are caused by human factors rather than system failures during operation. And, as a potential outcome of such situations is a higher risk of mid-air collision, as it is ratified in the assessment performed by EASA (2021), which has considered an issue of “ACAS RA not followed” to be a contributor factor for an airborne collision.

Exhibiting the same concern over the risks from rates of resolution advisory non-compliance, Baroux *et al*. (2022) uses it as one of the main arguments for automatic conflict resolution, describing the TCAS integration

with autopilot done by Airbus in some of their aircraft, being it currently the only certified system operating in large aircraft with that capability.

In addition to the relatively low pilot compliance to TCAS RAs, a reduction of task execution workload for the pilots, clearly indicated by the upgrade on level of action automation, can also be understood as a benefit from implementing the auto-RA function. On a continuously denser airspace, this automation improvement is inline with a continuous search of systems that can turn operations safer, addressing risks related to airborne collision.

Another argument that can be stressed for an automatic RA is the intensity of manual maneuvers applied to comply with RAs, either not ensuring proper separation or degrading aerodynamic characteristics and eventually leading to passengers' injury in some situations. One example is the 2010 accident from report DCA10LA083 of the NTSB (2021), causing an injury to the passenger of an Embraer ERJ 170 100 SE who was at the lavatory when a TCAS RA occurred, being the compliance maneuver classified as abrupt.

Pritchett & Fleming (2013) also studied and tested an auto-RA function, with pilots leaving the autopilot engaged in 83% of the RAs (crossing-climb RAs were the least compliant). Mode confusion was also reported after clear of conflict. This capability was examined more closely by (Pritchett, Haga, & Li (2016). By stressing different conflict scenarios with Part 121 and Part 135 pilots, the authors acknowledge an increased compliance rate when using the function, but point out some possible drawbacks: when the autopilot was disengaged during an RA, it took longer for the pilots to achieve the target vertical rate; also, considering the auto-RA function only shifted the compliance rate from 53% to 76%, they conclude this technology can help, but not guarantee full compliance. In addition, pilots' acceptance of the function depend on several additional factors such as traffic, etc., so the authors suggest it could improve compliance in generally complying events and worsen it when pilots do not generally comply, being the impact of this automation only situational.

From the work of Olszta & Olson (2010), who evaluated real-world TCAS RA encounters in the United States from 2008 to 2009, using data from different airports (and different timeframes for each airport), it is relevant to add another dimension in this analysis: the differences of TCAS RA occurrences between different types of operation. The authors found a considerable variation: "RA rates for business jets were 4.5 times higher than major air carriers and 2.5 times higher than regional air carriers" (Olszta & Olson, 2010, pp. 4.A.1-1), which is at least partially explained by operation environment factors, *e.g.*, in opposition to business jets, major air carriers mostly under Instrument Flight Rules (IFR) and ATC service providing separation from other traffic in Class B airspace during low-altitude terminal operations. Figure 3 shows exactly this influence of the rules and aircraft operating at each class of airspace. Of course, it is important to note most of business jets operations occur at least restricted airspace and also that, independently of type of operation, class B has lower RA rates than classes C and D, for example (Olszta & Olson, 2010).

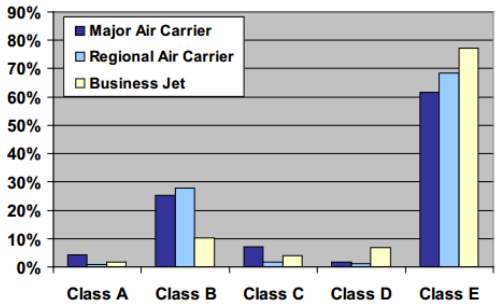


Figure 3. Percentage of RAs by Airspace (Olszta & Olson, 2010).

Also as a finding of Olszta & Olson (2010), "Pilot non-compliance is relatively uniform among operational categories and appears to be a major contributing factor in low separation events", which although needs to take into account that in many cases either the pilots might have visually acquired the intruder or had incorrectly identified the threat aircraft, is in-line with other studies referenced herein.

Considering much is impacted by the operation environment, not only TCAS logic improvements can benefit from these findings, but also automation design, focusing further system assistance where most relevant, ensuring behavior and usage fit the purpose of establishing a safe separation between aircraft.

6. FLIGHT SAFETY IMPACTS

From the previous chapters' discussion, detailing the safety concerns that can be mitigated with the automation of TCAS RA compliance, it can be added that several systems, from displays to flight control stabilizers, contain automated functions that assist the pilot in achieving increased safety. A system for automatic RA compliance which is efficient in execution and designed accounting for the human-automation interaction can be capable of helping to reduce near mid-air collision occurrences.

For that to happen, as already reinforced, it important to evaluate carefully its downsides and possible effects on pilots during flight. Considering that, this chapter summarizes the analysis done in (Richter, 2022).

Regarding cognitive complexity in modal automation, it is extremely relevant to understand that system states won't always be readily available in operators' memory, especially in high-workload situations such as an automatic system engagement to follow an RA, creating a pilot-independent mode transition. High system complexity, as Javaux (1998) analyses, is a key factor in this sense. Another aspect that affects mode consciousness is system feedback and annunciations, which facilitate comprehension but might also suffer from possible representation inaccuracies or delays that can deteriorate precise detection, leading to undesirable situations such as operation errors and potential safety reduction (Albano, 2021).

From the work of Parasuraman & Manzey (2010), the following human factors can be highlighted as applicable to the automatic RA compliance being analyzed:

- *Higher prevalence of automation complacency in multitasking environments*: even with the autopilot conducting the RA compliance, this cannot be considered a single-task phase considering the pilots have to monitor several aircraft information and ATC communication at the same time.
- *Lower detection rate of automation failures with constant-reliability than with variable-reliability:* current certification requirements and production techniques make systems constantly highly reliable in most of the situations, requiring clear monitoring clues and specific experience in varied contexts.

With a perspective focused on the effects of automation surprise and its underlying reasons, on the other hand, it is worth to highlight, from De Boer & Dekker (2017):

- *Lack of knowledge about the automation in the context of the operation*: pilot needs to be aware of the sequence and criteria that will make the aircraft enter in this specific mode, therefore the importance of predictability and bringing operators closer to the design.
- *Quality and sufficiency of information presented:* if feedback is not clear enough, pilots are more prone to automation surprise.
- *No significant reduction in trust when experiencing an automation surprise:* for this system, it can be seen as positive, since trust is an essential characteristic to allow a proper execution with no unnecessary interventions.

Results from Balfe, Sharples, & Wilson (2018) showed that trust upon safety-critical systems arises from a good knowledge of the system in the operation context, as well as appropriate system transparency through feedback, rather system reliability itself.

The design solutions to overcome incomplete feedback leading to less mode awareness need to be evaluated to avoid causing a "fragmentation of feedback" (Ferris, Sarter, & Wickens, 2010) and, considering the criticality of a potential in-flight encounter, it is important that all the necessary information to be assessed is concentrated and harmonized. During a conflict resolution, it is desired some degree of attention tunneling to guarantee a successful conflict clearance. However, it is also important to leave some attention for enough scanning of other sources maintaining situational awareness (Brown, 2016).

In addition but not least important, as emphasized by Pritchett & Fleming (2013), is to allow pilots to disengage automatic RA to manually fly the aircraft if necessary.

7. DESIGN RECOMMENDATIONS

Still with the focus on a concern with the influence of system behavior on human performance at a development phase, a set of recommendations are drawn to support the

design of systems that have the ability to automatically comply with TCAS RAs, while avoiding as much as possible negative effects on the airworthiness and safety.

The following recommendations were proposed in (Richter, 2022) and are centered on design aspects:

- *Evaluate if automating RA compliance function is consistent with aircraft current capabilities.*
- *Maintain displays' harmonization, including colors for armed/active modes and alerts consistency.*
- *Evaluate not only the possible states of TCAS inputs, but also all possible transitions between states.*
- *Establish logical limits for autopilot RA maneuver based on aircraft operational envelope.*
- *Provide visual feedback if TCAS advisory exceeds autopilot execution limits.*
- *Provide clear and visible mode feedback, anticipating mode transitions if possible.*
- *Set a high priority for the TA and automatic RA modes, evaluating each possible transition from and to other modes.*
- *Evaluate either: automatic return to the previous active modes, automatic transition to default modes or keeping a visual indication of previous active modes during automatic RA execution.*
- *Provide different visual and aural alerts for TA and RA modes.*
- *Provide a clear feedback of RA compliance status (based on target and avoidance zones), anticipating an exit from safe zones with flight path and TCAS symbology.*
- *Include feedback cues that can assist the monitoring task using underlying logic (e.g., consistency check between TCAS input commands and actual aircraft movement).*
- *Set an acceptable maximum amount of time to reach each RA compliance for definition of acceleration command limits, taking into consideration controlled and smooth dynamic for adequate predictability and monitoring.*
- *When initiating the RA mode on autopilot, activate a display mode (preferably on a head-up display) that highlights critical TCAS information, such as target and avoidance zones, for reduction of focus on non-priority information which could cause distractions, leaving adequate resources to monitor RA execution and flight-critical parameters.*
- *Evaluate the severity of new failure conditions considering new potential mishaps, developing with adequate process assurance.*
- *Design a fail-safe architecture for incorrect compliance to RA and missing RA.*
- *Create new failure messages (visual and aural) concerning loss of automatic RA function before or during execution (higher priority) for the pilot to be aware if intervention is necessary.*
- *Review consistency between new and existing TCAS failure messages.*
- *Record internal performance data for interface, logic or feedback improvements.*
- *Make an exhaustive analysis of normal and failure scenarios, validating the solution for each one.*
- *Ensure proper testing of normal and failure scenarios (which might require exiting automatic RA mode).*
- *Involve operators in the decision-making process during development from early to late stages, acquiring feedback for developers as much as possible.*

8. FINAL CONSIDERATIONS

The present work has analyzed the impact of the automation of TCAS RA compliance, evaluating which are the main characteristics and potential effects related to human-automation interaction to be given close attention, in order to build systems that are at the same time efficient in their functions and safe in their operation. In addition, it brings relevant data from aviation accidents to justify the discussions raised and goals presented.

All that is summarized in a set of design recommendations to support a continuous enhancement of existing system safety solutions while carefully evaluating risks.

Within the next years, flight data related to this automation might become more available if more aircraft implement it, and it is essential to use it to improve system design and pilots' training.

Finally, an also continuous work on certification requirements cannot be neglected, assessing if any revision needs to be done in to advance on the comprehension and safe implementation and operation of such systems.

9. REFERENCES

Albano, L. M. (2021). *Análise da Confusão de Modo de Automação em Pilotos Brasileiros de Linha Aérea.* Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP, Brasil.

ASRS. (2022). *Aviation Safety Reporting System*. Retrieved August 05, 2022, from ASRS Database Online: https://asrs.arc.nasa.gov/

Balfe, N., Sharples, S., & Wilson, J. R. (2018, June). Understanding Is Key: An Analysis of Factors Pertaining to Trust in a Real-World Automation System. *Human Factors, 60*(4), 477-495. doi:10.1177/0018720818761256

Baroux, C., Cardona, F., Corral, C., Durepaire, X., Lopez Villarejo, M., & Villeneuve, C. (2022, January). Safe Handling of TCAS Alerts. *Safety First*(33), pp. 6-16.

Billings, C. E. (1997). *Aviation automation: the search for a human-centered approach.* Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.

Boeing. (2021). *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents: Worldwide Operations | 1959 – 2020.* Boeing Company, Chicago/IL, USA. Retrieved September 8, 2022, from https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf

Brown, J. (2016). The Effect of Automation on Human Factors in Aviation. *The Journal of Instrumentation, Automation and Systems, 3*(2), 31-42. doi:http://dx.doi.org/10.21535%2Fjias.v3i2.916

Chappell, S. (1990). Human Factors Research for TCAS. *Conference on the TCAS - Its Development, Testing, Installation and Operational Use* (p. 19). London, UK: Royal Aeronautical Society.

De Boer, R., & Dekker, S. (2017, September). Models of Automation Surprise: Results of a Field Survey in Aviation. *MDPI Safety, 3*(3 - Aviation Safety). doi:https://doi.org/10.3390/safety3030020

Dekker, S. W. (2014). *The Field Guide to Understanding 'Human Error'* (3rd ed.). Surrey, UK: Ashgate Publishing Ltd.

EASA. (2021). *Annual Safety Review 2021.* European Union Aviation Safety Agency (EASA), Cologne, Germany. doi:10.2822/071257

EASA. (2021). *European Plan for Aviation Safety (EPAS) 2022-2026 Volume I - Introduction & Strategy.* European Union Aviation Safety Agency (EASA), Cologne, Germany.

Eurocontrol. (2022). *Aviation Outlook 2050 - Main Report.* Eurocontrol, Brussels, Belgium.

Eurocontrol. (2022). *The Assessment of Pilot Compliance with TCAS RAs, TCAS Mode Selection and Serviceability Using ATC Radar Data, Edition 2.2.* Assessment, Eurocontrol, Brussels, Belgium.

FAA. (2022). *Aerospace Forecast Fiscal Years 2022–2042.* Federal Aviation Administration (FAA), Washington DC, USA.

Ferris, T., Sarter, N., & Wickens, C. D. (2010). Cockpit Automation: Still Struggling to Catch Up…. In E. Salas, & D. Maurino, *Human Factors in Aviation* (2nd ed., p. 732). London, UK: Academic Press.

Gawron, V. (2019). *Automation in Aviation - Accident Analyses.* MITRE Center for Advanced Aviation System Development (CAASD), MacLean/VA, USA.

IATA. (2022). *Mid-air Collision*. Retrieved August 01, 2022, from International Air Transport Association: https://www.iata.org/en/programs/safety/operational-safety/midair-collision/

ICAO. (2006). *Doc 9863 Airborne Collision Avoidance System (ACAS) Manual.* Manual, International Civil Aviation Organization (ICAO), Montréal/Quebec, Canada. Retrieved from https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9863_cons_en.pdf

ICAO. (2011). *Aviation Occurrence Categories v4.2.* Commercial Aviation Safety Team/International Civil Aviation Organization, Montréal/Quebec, Canada. Retrieved from Commercial Aviation Safety Team (CAST) / International Civil Aviation Association (ICAO).

ICAO. (2019). *Doc 10004 Global Aviation Safety Plan.* International Civil Aviation Organization (ICAO), Montréal/Quebec, Canada.

Javaux, D. (1998). Explaining Sarter & Woods' Classical Results: The Cognitive Complexity of Pilot-Autopilot Interaction on the Boeing 737-EFIS. *Second Workshop on Human Error, Safety, and Software Design* (pp. 62-77). Seattle/WA, USA: University of Washington. Retrieved from https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.122.3608&rep=rep1&type=pdf

Kochenderfer, M. J., Holland, J. E., & Chryssanthacopoulos, J. P. (2012). Next-Generation Airborne Collision Avoidance System. *Lincoln Laboratory Journal, 19*(1), 17-33.

Kuchar, J. E., & Drumm, A. C. (2007). The traffic alert and collision avoidance system. *Lincoln Laboratory Journal, 16*(2), 277-296.

NTSB. (2021). *Aviation Accident Final Report DCA10LA083 / 2010.* Aviation Accident Final Report, National Transportation Safety Board (NTSB), US Department of Transportation, Washington DC, USA. Retrieved September 5, 2022, from https://data.ntsb.gov/Docket?ProjectID=76906

Olszta, J., & Olson, W. (2010). A comparative study of air carrier and business jet TCAS RA experiences. *29th Digital Avionics Systems Conference* (pp. 4.A.1-1-4.A.1-10). Salt Lake City, UT, USA: IEEE. doi:10.1109/DASC.2010.5655358

Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010, June). Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration. *Human Factors, 52*(3), 381-410. doi:10.1177/0018720810376055

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997, June). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse. (I.

Sage Publications, Ed.) *Human Factors, 39*(2), 230-253.

Parasuraman, R., & Sheridan, T. B. (2000). A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 30*(3), 286-297.

Pritchett, A. R., Haga, R. A., & Li, H. (2016, December). Attempting to Automate Compliance to Aircraft Collision Avoidance Advisories. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 13*(1), 18-25. doi:10.1109/TASE.2015.2500959

Pritchett, A., & Fleming, E. S. (2013). Pilot Compliance to TCAS Resolution Advisories. *32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 6B6-1 - 6B6-13). East Syracuse/NY, USA: IEEE/AIAA. doi:10.1109/DASC.2013.6712618

Richter, M. S. (2022). Safe Automation of Aircraft Control for Conflict Resolution in Traffic Alert and Collision Avoidance Systems. *Final paper, Specialization in Flight Safety and Continued Airworthiness*, 24.

Save, L., & Feuerberg, B. (2012). Designing Human-Automation Interaction: A New Level of Automation Taxonomy. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2012 Annual Conference* (p. 14). Toulouse, France: Human Factors and Ergonomics Society Europe.

UK Department for Transport. (2021). *UK Government Digital Service*. Retrieved August 05, 2022, from Statistical data set: Aviation (TSGB02): https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/tsgb02

Wichgers, J. M. (2015). Automatic Dependent Surveillance - Broadcast. In C. Spitzer, U. Ferrell, & T. Ferrell, *Digital Avionics Handbook* (3rd ed., pp. 364-380). Boca Raton, USA: CRC Press.

STRUCTURED REINFORCEMENT LEARNING FOR AIR TRAFFIC FLOW MANAGEMENT

Patrice Zombré, Daniel Delahaye, Innocent O. Davidson, Rafael Lima de Carvalho, Felix Mora-Camino*
ASECNA, Dakar, Sénégal
Ecole Nationale de l'Aviation Civile-ENAC, France
Cape Peninsula University of Technology-CPUT, South Africa
Universidade Federal do Tocantins-UFT
Universidade Federal Fluminense-UFF and Durban University of Technology-DUT

*** Corresponding author e-mail address**: moracamino@hotmail.fr

PAPER ID: SIT2251

ABSTRACT

This study considers mainly the pre-tactical planning level where the global balance of traffic flows is already fixed (flows structures and levels, ATC sectors and capacity) and where flights are treated on an individual basis in the space between the different departure/arrival airports. Then, for each flight, decisions such as ground delayed departure (resulting in flight rescheduling) and/or rerouting may be taken to cope with predicted traffic congestion situations. In this study, the adopted objective is the global reduction of interactions between flights considered by ATC while maintaining as much as possible the original efficiency of flight plans computed by airlines, taking into account aircraft performances and short-term weather forecasts. For that, a multidirectional flight centric complexity index is adopted to assess the degree of interaction between flights. A flight scheduling policy based on the global degree of asymmetry of the complexity indexes of the flights is designed to process the whole set of considered flights. For each flight, the effect on traffic smothness of applying a delayed departure is assessed based on the level of asymmetry of the longitudinal complexity indexes. Then, local lateral complexity indexes are computed along each flight in a synchronous way, so that the need of lateral deviations can be characterized. A global optimization problem is considered with two main objectives: reducing the overall traffic complexity and minimizing deviations from the original flight trajectories. Equivalent directional separations are introduced to quantify locally the threat of surrounding traffic in each direction and propose directions of improvement of separations when necessary. Then, for each direction a proportionality factor has to be chosen to minimize the global optimality criterion, this can be performed even for large instances of this problem by using Reinforcement Learning techniques. The proposed solution approach is qualified of 'structured" since it avoids the Black Box image of many IA techniques by directing the search process for a better traffic solution.

Keywords: Air Traffic Flow Management, Air Traffic Control, Traffic Complexity Measures, Reinforcement Learning, Flight Scheduling.

1. Introduction

The objective of Air Traffic Flow Management (ATFM) is to balance in space and time air traffic demand with available capacity and services, providing feasible levels of workload to the Air Traffic Control (ATC) system. Then, not only safety is insured by limiting the occurrence and the complexity of traffic conflicts, but also original flight efficiency is sustained by avoiding large deviations from flight plans leading to the use of uneconomic flight levels, in-flight holdings and other traffic congestion induced effects. ATFM activities include medium term strategic planning where traffic flows and ATC capacity are managed, pre-tactical planning where flights are eventually rescheduled and rerouted when tactical decisions such as ground delay departures are pre-established, and finally, on the day of implementation, in a close interaction with ATC, the monitoring of air traffic.

This study considers mainly the pre-tactical planning level where the global balance of traffic flows is already fixed by the strategic level (flows structures and levels, ATC sectors and capacity) and where flights are treated on an individual basis in the airspace between the different departure/arrival airports. Then for each flight, decisions such as ground delayed departure (resulting in flight rescheduling) and/or rerouting may be taken to cope with predicted traffic congestion situations and with weather events. In this study, the adopted objective is the global reduction of interactions between flights while maintaining as much as possible the original efficiency of flight plans computed by airlines, taking into account aircraft performances and short-term weather forecasts. For that, a multidirectional flight centric complexity index is adopted to assess the degree of interaction between flights and standing as a possible common driver for ATFM and ATC actions.

The paper is composed of the following sections. In section 2, the main functions of ATFM are discussed and the existing optimization approaches for pre-tactical planning are briefly analyzed. In section 3 a local traffic criticality index is considered to build an intrinsic flight centric complexity metric, leading to the formulation of a first optimization problem. Then, in section 4, directional complexity metrics are introduced as well as equivalent directional threats. In section 5, it is shown how these metrics can be used to establish effective ground delay decisions or to reroute traffic so that separations are globally increased. At this stage, the previous global optimization problem is revisited with the proposition of a Reinforcement Learning solution strategy based on these directional metrics. Finally, in the conclusion, the strengths and weaknesses of the proposed approach are discussed as well as possible extensions.

2. Air Traffic Flow Management

2.1 Definition and composition: Air Traffic Flow Management is a service provided by air traffic authorities with the objective of contributing to a safe and efficient air traffic operation. While the primary objective of Air Traffic Control (ATC) is to prevent collisions between aircraft following flight plans between a departure and an arrival airport, ATFM has already processed these flight plans in terms of 3D+T trajectories. According to foreseen airport and airspace ATC capacities, these original flights plans which in general represent for the aircraft operators the best trade-off between their operational costs and the quality of service to end users (passengers, cargo), are modified by the ATFM services. This will allow the ATC to perform more efficiently its service even if notions such as

"optimized traffic flows" and "sector capacities" remain difficult to apprehend and quantify. ATFM is particularly important in the case of traffic congestion where traffic demand must be diluted spatially and redistributed over time, so that ATC is able to process it efficiently. Traffic congestion can be systemic in the sense that the structure and volume of demand for air Traffic Services and the available means (people and infrastructures) are locally unbalanced over a long period of time. It can be a temporary situation as the result of seasonal effects, provisional regulations or protection measures (forbidden overflight areas), or the result of unforeseen perturbations (bad weather conditions, strikes).

This leads to develop ATFM cooperation with ATC on three time perspectives: strategic planning, pre-tactical planning and tactical operations. In strategic planning expected traffic flows are rerouted in accordance with ATC capacity which can be enhanced if necessary to cope with excess demand. In pre-tactical planning, i.e. one day in advance, the traffic flow strategic measures are tuned and their influence at the flight level becomes effective. At tactical level, ATFM monitors the implementation of traffic measures and to prevent local congestion in ATC sectors, it implements flight delays and restrictions. In (Mondoloni et al., 2020) different interaction schemes between ATFM and ATC are discussed for tactical operations in the framework of Trajectory Based Operations (TBO) which is the one adopted in this study.

2.2 ATFM optimization approaches

In the last decades, exact and approximate mathematical programming approaches have been developed to harmonize traffic demand with respect to the predicted available capacity. This problem has been often formulated as an optimization problem to be tackled centrally and in a global way. The optimization objective is in general the minimization of the total delay incurred by the considered air flows under flights separation and sectors capacity constraints. This has led to large scale optimization problems where computing time is a limiting issue.

Bertsimas and Patterson (Bertsimas and Patterson, 1998) were among the firsts to propose a 0-1 formulation for the ATFM problem with airspace sector capacities. This formulation is extremely simplified and represents airspace by a succession of adjacent sectors characterized by capacity and crossing duration. This formulation was intended to treat ground delays as well as rerouting of flights at the pre-tactical stage. The adopted formulation turns difficult to establish a relationship between the trajectory actually followed by the aircraft using its Flight Management System and its representation in this formulation. Moreover, this problem is NP-complete. Different approaches have been proposed to solve this problem, from exact (Zhang and Mahadevan, 2017), (Hamdan et al. , 2021)) to heuristic (Junker , 2012), (Zhang et al. 2018) methods. While other formulations have been proposed without providing relevant results, the initial formulation in (Bertsimas and Patterson, 1998) has been improved by authors such as (Hamdan et al., 2023). More recently, Artificial Intelligence techniques such as Machine Learning, Reinforcement Learning and Deep Reinforcement Learning have been considered to contribute to the solution of ATFM problems. Learning can be based on messages exchanged by ATFM and controllers (Alves et al., 2008) or on images representing the traffic inside and around control sectors (Mas-Pujol et al., 2022).

3. Intrinsic Complexity Metric for Traffic Flows and Global De-Conflicting Approach.

In this section, after proposing a criticality measure of separation between aircraft, an intrinsic measure is proposed to assess traffic complexity around each aircraft and a first optimization problem is established to minimize the complexity of traffic submitted to ATC. Here time is discretized according to a period ΔT compatible with TCAS dynamics and to each planned trajectory of a considered flight i, $i \in I$, it is generated a set of reference points $P_i(k)$ with $k \in [K_i^D, K_i^A]$ where K_i^D is the planned departure time of flight i and K_i^A is the planned arrival time. Let the considered full time span be given by $K = \left[\min_{i\in I} K_i^D, \max_{i\in I} K_i^A\right]$ and the current set of flights active at time k be given by $I(k) = \{i | K_i^D \leq i \leq K_i^A\}$.

Here, function $H(x)$ defined over $\boldsymbol{R}^+ - \{0\}$ from a truncated logarithm function (see Figure 1) which has been proposed in (Zombré et al., 2022) is considered:

$$H(x) = -\lambda \cdot ln\, x \qquad if\ \ 0 < x \leq 1$$
$$\text{and} \quad H(x) = 0 \qquad if\ x > 1 \qquad (1)$$

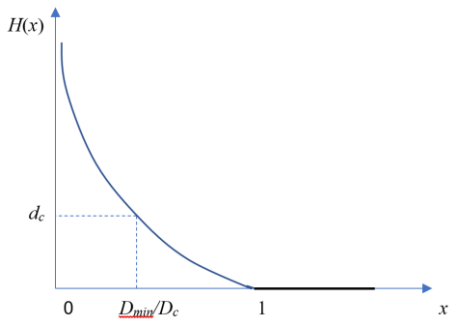


Figure 1 Level of criticality of separation

A threshold distance $D_c^{s_i s_j}$ is introduced below which it is considered that separation between aircraft i and j is too small. A reduced variable δ_{ij} is also introduced:

$$\delta_{ij} = D_{ij}(k)/D_c^{s_i s_j} \qquad (2)$$

where $D_{ij}(k)$ is the distance between aircraft i and j at instant k.

The criticality level of the current separation between aircraft i and j is given by:

$$Cr_{ij}(k) = H(\delta_{ij}) = -\lambda \cdot ln(\delta_{ij}(k)) \text{ with } Cr_{ij}(k) = 0 \text{ when } \delta_{ij}(k) \geq 1. \qquad (3)$$

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 declared and ATC needs to interfere, assuming that the criticality level is equal to d_c in this situation, then:

$$\lambda = d_c / ln(D_c^{s_i s_j} / D_{min}^{s_i s_j}) \qquad (4)$$

Looking ahead for the criticality of an interaction between two close aircraft i and j, a one-step prediction can be computed for their criticality:

$$Cr_{ij}(k+1) = -\lambda \cdot ln(\delta_{ij}(k+1))$$
$$\approx -\lambda \cdot ln(\delta_{ij}(k) + \dot{\delta}_{ij}(k) \cdot \Delta T) \qquad (5)$$

The derivative $\dot{\delta}_{ij}(k)$ can be computed directly from the current speed vectors of aircraft i and j.

The full complexity of traffic around aircraft i at position $P_i(k)$ at time k is then given by:

$$FC_i(P_i(k)) = \sum_{j:D_{ij}(k)/D_c^{s_i s_j} \leq 1} Cr_{ij}(k+1) =$$
$$-\lambda \cdot ln\left(\prod_{j:D_{ij}(k)/D_c^{s_i s_j} \leq 1} (\delta_{ij}(k) + \dot{\delta}_{ij}(k) \cdot \Delta T)\right) \qquad (6)$$

Then, a possible objective could be to minimize with respect to $P_i'(k)$, $i \in I$, $k \in [K_i^D, K_i^A]$, the expression:

$$\sum_{i\in I} \sum_{k=K_i^D}^{k=K_i^A} (FC_i(P_i'(k)) + W.\|P_i'(k) - P_i(k)\| \qquad (7)$$

where the first part represents the total traffic complexity as defined above and the second part, the weighted (W) distance between the initial trajectory of flight i and the optimized one. Observe that when safe separations are established, the first part of the criterion is zero and there is no need to modify the flight trajectories. In fact, when considering ground delay policies and trajectory modifications

which may modify the travelled distance, the above expression for the optimization criterion becomes more complex. This formulation does not consider explicitly the capacity issue since it is assumed that the capacity of sectors has been already taken into account when processing the trajectories of the set of flights I at an earlier stage with a simplified mathematical formulation, as discussed in section 2.2. Anyway, solutions of the considered problem should increase separations between aircraft and then ease the subsequent ATC task.

When coming to the issue of the design of a solution approach for this highly nonlinear and nonconvex problem, Genetics Algorithms which are involved with the random search of a global solution through repeated evaluation of a performance function (reference), could be effective in the case of small instances. In the next sections, an open approach based on a more detailed complexity information is proposed to allow to deal with real size problems.

4. Directional traffic complexity

The previous complexity measure is here split along six directions to quantify the need for local trajectory changes along these directions. Let us define a local reference, as displayed in Figure 2, to assess the surrounding traffic complexity for flight i at time t_k:

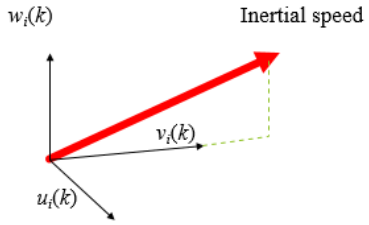


Figure 2 Local reference definition

Here, $(u_i(k),v_i(k))$ is the local horizontal plane for the aircraft at time t_k, and $(v_i(k),w_i(k))$ is the local vertical plane containing the inertial speed of the aircraft. At time t_k, it is then possible to subdivide the space around aircraft i as:

Left-Right half spaces to consider lateral maneuvers, respectively indexed as L and R; Up-Down half spaces to consider vertical maneuvers, respectively indexed as U and D; Front-Past half spaces to consider delay maneuvers, respectively indexed as F and P.

Let us define the sets of flights $F_i^x(k)$ with x belonging to the set of indexes $\{L, R, U, D, F, P\}$, where $F_i^x(k)$ is the set of flights close to flight i that are at time t_k in position x with respect this flight. With:

$$\left\{j \middle| \overrightarrow{d_{ij}(k)} \cdot \overrightarrow{u_i(k)} < 0 \text{ and } \delta_{ij}(k) \leq D_{max}^{s_i s_j +} / D_c^{s_i s_j}\right\} = F_i^L(k) \quad (8)$$

we have:

$$F_i^L(k) \cap F_i^R(k) = \emptyset \quad F_i^U(k) \cap F_j^D(k) = \emptyset \quad F_i^F(k) \cap F_i^P(k) = \emptyset \quad (9.1)$$

$$F_i^L(k) \cup F_i^R(k) = F_i^U(k) \cup F_i^D(k) = F_i^F(k) \cup F_i^P(k) = F_i(k) \quad (9.2)$$

Left and right lateral complexities for flight i at time t_k are given by:

$$C_i^L(k) = \max_{\overrightarrow{d_{ij}(k)} \cdot \overrightarrow{u_i(k)} < 0,\ j \in F_i^L(k)} Cr_{ij}\left(\delta_{ij}(k+1)\right) \cdot \cos\left(\overrightarrow{d_{ij}(k)}, \overrightarrow{u_i(k)}\right) \quad (10.1)$$

$$C_i^R(k) = \max_{\overrightarrow{d_{ij}(k)} \cdot \overrightarrow{u_i(k)} \geq 0, j \in F_i^R(k)} Cr_{ij}\left(\delta_{ij}(k+1)\right) \cdot \cos\left(\overrightarrow{d_{ij}(k)}, \overrightarrow{u_i(k)}\right) \quad (10.2)$$

where $\overrightarrow{d_{ij}(k)}$ is the unit vector from flight i to flight j at time t_k.

$C_i^U(k)$, $C_i^D(k)$, $C_i^F(k)$, and $C_i^P(k)$ can be similarly computed, considering the vertical axis and the longitudinal axis.

$$C_i^P(k) = \max_{\overrightarrow{d_{ij}(k)} \cdot \overrightarrow{v_i(k)} < 0,\ j \in F_i^P(k)} Cr_{ij}\left(\delta_{ij}(k+1)\right) \cdot \cos\left(\overrightarrow{d_{ij}(k)}, \overrightarrow{v_i(k)}\right) \quad (11.1)$$

$$C_i^F(k) = + \max_{\overrightarrow{d_{ij}(k)} \cdot \overrightarrow{v_i(k)} \geq 0, j \in F_i^F(k)} Cr_{ij}\left(\delta_{ij}(k+1)\right) \cdot \cos\left(\overrightarrow{d_{ij}(k)}, \overrightarrow{v_i(k)}\right) \quad (11.2)$$

$$C_i^D(k) = \max_{\overrightarrow{d_{ij}(k)}\cdot\overrightarrow{w_i(k)}<0,\, j\in F_i^D(k)} Cr_{ij}\left(\delta_{ij}(k+1)\right)\cdot \cos(\overrightarrow{d_{ij}(k)}, \overrightarrow{w_i(k)}) \quad (11.3)$$

$$C_i^U(k) = + \max_{\overrightarrow{d_{ij}(k)}\cdot\overrightarrow{w_i(k)}\geq 0,\, j\in F_i^U(k)} Cr_{ij}\left(\delta_{ij}(k+1)\right)\cdot \cos(\overrightarrow{d_{ij}(k)}, \overrightarrow{w_i(k)}) \quad (11.4)$$

Figure 3 provides a representation of the surrounding traffic complexity for aircraft i at time k.

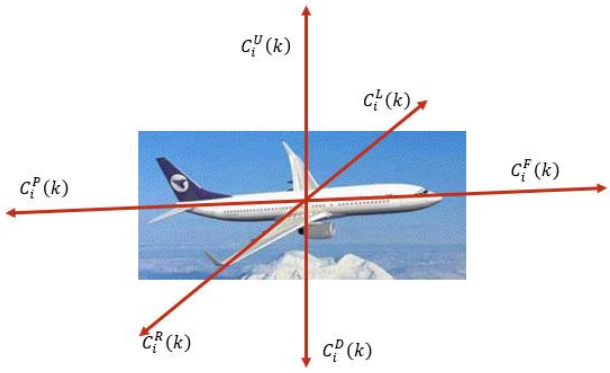


Figure 3 Directional complexities for flight *i* at time *k*

Equivalent directional threats can be computed where the threats coming from different sources can be replaced by a unique equivalent source. For example, for the lateral dimension it can be given by:

$$\text{If } C_i^L(k)=0:\ \delta_i^L(k) = \min_{j\in F_i^L(k)} D_{max}^{s_i s_{j+}},$$

$$\text{if } C_i^L(k) > 0:\quad \delta_i^L(k) = H^{-1}(C_i^L(k)) \quad (12)$$

and

$$\text{if } C_i^R(k)=0:\ \delta_i^R(k) = \min_{j\in F_i^R(k)} D_{max}^{s_i s_{j+}}$$

$$\text{if } C_i^R(k) > 0:\ \delta_i^R(k) = H^{-1}(C_i^R(k)) \quad (13)$$

and since $H(x)$ is a monotonously decreasing function for $x < 1$we have:

$$\forall j \in F_i^L(k):\ \delta_i^L(k) \geq \delta_{ij}(k)$$

$$\text{and } \forall j \in F_i^R(k):\ \delta_i^R(k) \geq \delta_{ij}(k) \quad (14)$$

So $\delta_i^L(k)$ and $\delta_i^R(k)$ provide lateral safeguards (see Figure 4) to flight i at time t_k. $\delta_i^U(k)$, $\delta_i^D(k)$, $\delta_i^F(k)$, and $\delta_i^P(k)$ can be defined and computed similarly. In Figure 4 it is shown how a left lateral deviation of the central aircraft increases traffic separation: a shift to the left of the reference aircraft (position 0) increases the reduced separation with the closest aircraft on the right, while the separation with the closest aircraft on the left, although reduced, remains safe.

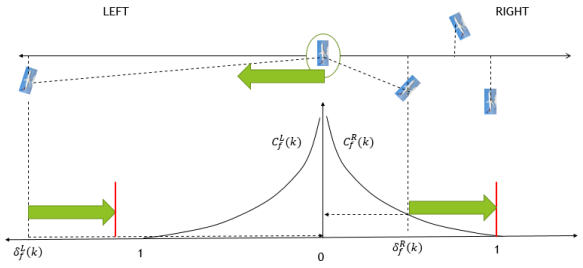


Figure 4 Management of lateral threats for flight *i* at time *k*

Figure 5 shows the separation margins along the three axes where:

$$D_c = \min_{i,j} D_c^{s_i s_j} \text{ and } D_{max} = \min_{i,j} D_{max}^{s_i s_j} \quad (15)$$

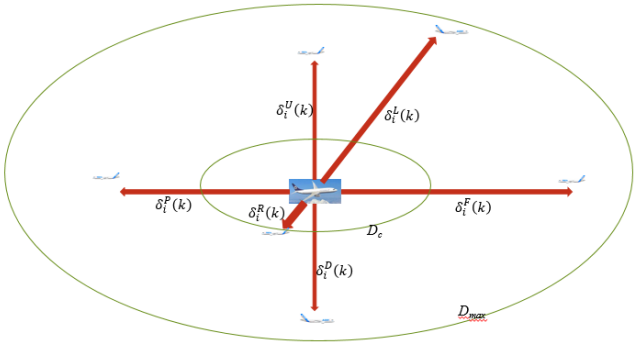


Figure 5 Separations margins for flight *i* at time *k*

5. De-Confliction based on directional complexity

Here is considered the situation in which a set of flights has been processed off-line in a pre-tactical stage to manage demand with respect to available capacity of sectors and the objective is now to de-conflict traffic by adjusting the 3D+T trajectories of these flights.

It is shown how de-confliction of traffic can be performed using directional complexity information. In this paper only actions on flights such as ground delay and lateral deviations are discussed, while vertical separation could be also managed using vertical directional complexity.

Delaying flights for de-confliction

Delaying a flight has in general no consequences on the performance of the flight whose track and vertical profile remain unchanged, except if weather condition change. This delay has a cost at the departing airport and induces operational restrictions at the arrival airport (connection constraints, curfew, …). So, it is supposed that for any reasons, a maximum delay $T^i_{max}$is assigned to each flight *i*. It appears of interest to delay flight *i* if its past complexity is globally much higher than its future complexity along the flight trajectory:

$$\sum_{K_i^D \le k \le K_i^A} C_i^P(k) >> \sum_{K_i^D \le k \le K_i^A} C_i^F(k) \quad (16)$$

A free delay assigned to flight *i*, TF^i, will not create threats to other flights and will be such as:

$$TF^i \le TF^i_{max} = \min\left\{ \min_{K_i^D \le k \le K_i^A} (\max\{0, (\delta_i^F(k) - D_c)/(\overrightarrow{V_i(k)} \cdot \overrightarrow{v_i(k)})\}), T^i_{max} \right\} \quad (17)$$

If TF^i is zero, delay can remain of interest for flight *i* but then a trade-off must be established between front and rear traffic complexity. Let w_i be a tentative delay for flight *i*, a trade-off is reached if:

$$\sum_{K_i^D + w_i \le k \le K_i^A + w_i} C_i^P(k) \approx \sum_{K_i^D + w_i \le k \le K_i^A + w_i} C_i^F(k) \quad (18)$$

where the indexes $C_i^P(k)$ and $C_i^F(k)$ have been re-computed for each value of w_i. Once a delay is assigned to a flight, the complexity indexes of the flights in interaction with flight *i* must be re-computed.

At operations, TF^i_{max}can be a very valuable information for the control tower of an airport when it has to deal with some traffic perturbation and has to reschedule departures.

Processing a temporal front-line for lateral deconfliction

The spatial trajectory of a flight *i* is supposed to be discretized to build the sequence of positions $P_i(k) \in R^3$ and speeds $V_i(k) \in R^3$, $t_k = k \cdot \Delta T$, $K_i^D \le k \le K_i^A$, where the ground speeds are limited by aircraft performances and foreseen weather conditions (winds) :

$$V_i^{min} \le V_i(k) \le V_i^{max} \quad (20)$$

Let $F(k)$ be the set of flights operating at time t_k, compute for them $C_i^R(k)$ and $C_i^L(k)$, and then $\delta_i^R(k)$and $\delta_i^L(k)$, $i \in F(k)$. Then, these flights can be classified at time t_k as being isolated, $i \in I(k)$, in the left border, $i \in L(k)$, central, $i \in C(k)$ or right border, $i \in R(k)$:

$$i \in I(k) \quad if\ C_i^L(k) = C_i^R(k) = 0 \quad (21.1)$$

$$i \in L(k) \quad if\ C_i^L(k) = 0\ and\ C_i^R(k) > 0 \quad (21.2)$$

$$i \in C(k) \quad if\ C_i^L(k) > 0\ and\ C_i^R(k) > 0 \quad (21.3)$$

$$i \in R(k) \quad if\ C_i^L(k) > 0\ and\ C_i^R(k) = 0 \quad (21.4)$$

The following lateral deviations can be performed:

If flight $i \in I(k)$ no action is necessary. If flight $i \in R(k)$ a right lateral deviation will be performed:

$$P_i'(k) = P_i(k) + \mu_i^R(k) \cdot \vec{u}_i(k) \cdot (\delta_i^R(k) - D_c) \quad (22.1)$$

If flight $i \in L(k)$ a left lateral deviation will be performed:

$$P_i'(k) = P_i(k) - \mu_i^L(k) \cdot \vec{u}_i(k) \cdot (\delta_i^L(k) - D_c) \quad (22.2)$$

If flight $i \in C(k)$, right and left threats must be balanced:

$$P_i'(k) = P_i(k) + \mu_i^C(k) \cdot \vec{u}_i(k) \cdot \left(\delta_i^R(k) - \delta_i^L(k)\right)/2 \quad (22.3)$$

Then, $\mu_i^R(k)$, $\mu_i^L(k)$ and $\mu_i^C(k)$ are chosen as solutions of the following problem:

$$\min_{\mu_i^x(k), k\in K, i\in I(k), x\in\{R,L,C\}} \sum_{i\in I} \sum_{k=K_i^D}^{k=K_i^A} (FC_i(P_i'(k)) + W. \|P_i'(k) - P_i(k)\|) \quad (23)$$

with the constraints:

$$V_i^{min} \cdot \Delta T \le \|P_i'(k) - P_i'(k+1)\| \le V_i^{max} \cdot \Delta T \quad \forall k \in K, \forall i \in I(k) \quad (24)$$

$$0 \le \mu_i^x(k) \le 1 \quad \forall k \in K, \forall i \in I(k), \forall x \in \{R, L, C\} \quad (25)$$

There constraints (24) insure that the new flight segments are flyable in the time period ΔT while constraints (25) insure that no new local conflict is generated while introducing a lateral deviation. This problem can be solved using Reinforcement Learning which is a set of optimization techniques which associate basic principles of Mathematical Programming with the computation power of IA techniques. Here the search directions are specified for the optimizer (relations (22)) reducing the computational burden and avoiding the Black Box image of many IA techniques. The reward functions are given by the components of expression (23) taken in chronological order while the states are composed of the reference points charactering the current trajectory of each flight.

With this Structured Reinforcement Learning, validation of results is performed naturally through the rationale of the search process while the scalability of the solution approach is improved. The basic solution framework can be enhanced in different ways for instance by combining the track of two successive links to better define the lateral improvement directions, by processing flights in special order (for instance by first diverting flights which at a given time are on the borders of a congested area, then opening additional space for more central flights).

6. Conclusion

This work proposes an original approach to the management of separations at the pre-tactical level of ATFM. This approach is based on the use of aircraft centric directional indices of the complexity of traffic. To manage the separation of aircraft by lateral rerouting, a global optimization problem is considered. The proposed modelling approach also allows the introduction of separations of traffic with stormy areas and others. Reinforcement Learning is considered to solve this non-linear problem, but the proposed prior definition of improvement directions insures the digital sobriety of the resulting structured approach of Reinforcement Learning. Other solution approaches can be of interest. For instance, to improve scalability, decentralization of the solution process through decomposition of the problem according to the consideration of connectivity components between flights can be performed. Also observe that since the adopted chronological formulation preserves the parallel dynamics of traffic, Dynamic Programming remains a reference technique to compute exact solutions when assessing the quality of the solutions proposed by the Structured Reinforcement Learning approach.

References

Daniela P. Alves, Li Weigang and Bueno B. Souza, (2008). Reinforcement Learning to Support Meta-Level Control in Air Traffic Management, Published: January 1st, 2008

Reinforcement Learning, Edited by Cornelius Weber, Mark Elshaw and Norbert Michael Mayer. ISBN 978-3-902613-14-1, pp.424, January 2008, I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria.

Dimitris Bertsimas and S. S. Patterson, (1998). The air traffic flow management problem with enroute capacities, Operations Research, vol. 46, no. 3, pp. 406–422, 1998.

Dimitris Bertsimas, Guglielmo Lulli, and Amedeo Odoni, (2008).

The Air Traffic Flow Management Problem: An Integer Optimization Approach. A. Lodi, A. Panconesi, and G. Rinaldi (Eds.): IPCO 2008, LNCS 5035, pp. 34–46, 2008. c Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.

Ulrich Junker, (2012).

Air traffic flow management with heuristic repair. The Knowledge Engineering Review , Volume 27 , Special Issue 3: Constraint Programming for Air Traffic Management , 26 July 2012 , pp. 333 – 342.

Sadeque Hamdan, Ali Cheaitou, Oualid Jouini, Tobias Andersson Granberg, Zied Jemai, Imad Alsyouf, Maamar Bettayeb, Billy Josefsson, (2021).

Central Authority–Controlled Air Traffic Flow Management: An Optimization Approach, Transportation Science Published Online:13 Dec 2021.

Sergi Mas-Pujol, Esther Salamí and Enric Pastor,(2022).

Image-Based Multi-Agent Reinforcement Learning for Demand–Capacity Balancing, Aerospace 2022, 9, 599. https://doi.org/10.3390/aerospace9100599

Stéphane Mondoloni and Nicholas Rozen, (2020).

Aircraft trajectory prediction and synchronization for air traffic management applications , Progress in Aerospace Sciences, Volume 119, November 2020, 100640.

Yicheng Zhang, Rong Su, Qing Li, Christos G. Cassandras, and Lihua Xie,(2017).

Distributed Flight Routing and Scheduling for Air Traffic Flow Management, IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems, 2017, available online at http://ieeexplore.ieee.org. DOI 10.1109/TITS.2017.2657550.

Patrice Zombré, Innocent Davidson, Rafael Lima de Carvalho and Felix Mora-Camino, (2022).

A New Intrinsic Metrics for Air Traffic Complexity, SITRAER 2022, Paper SID 140.

AIR TRANSPORTATION GEOPOLITICS

Air Transportation Geopolitics is a technical area that studies demand and supply chains in air transportation, as well as airline planning and intermodality. Most of the authors are from the Brazilian southeast and northeast regions, including from research institutes and private companies.

This page intentionally left blank.

A INFLUÊNCIA DO E-COMMERCE NA MOVIMENTAÇÃO DE CARGA AÉREA NO BRASIL

João Vitor de Alencar Amorim, Hélio da Silva Queiroz Júnior,
Viviane Adriano Falcão, Daniel Lopes Nader de Azevedo*
Federal University of Pernambuco (UFPE), PPGEC-UFPE / Coventry University

*** Corresponding author e-mail address:** daniel.nader@ufpe.br

PAPER ID: SIT2245

ABSTRACT

E-commerce boosted demand for air freight, leading one of the largest e-commerce companies in Brazil to partner with national airlines to operate exclusive cargo planes. This paper analyzes the growth of e-commerce and its impact on the air cargo market, aiming at more efficient planning and to identify air cargo and e-commerce correlation. Using Linear Regression and data from the National Civil Aviation Agency and Neotrust, it was identified that mailbags, exchange rates, current monthly GDP, and Covid-19 cases are important factors to predict air cargo. Demand for air cargo is being driven by the growth of e-commerce, which requires airlines and airports to adapt. Considering the atypical behavior of the market due to the Covid-19 pandemic from 2020 to 2022, it is necessary to further investigate these factors, as well as the products registered as postal mail and specific regions.

Keywords: Air cargo, E-commerce, Linear regression, Linear model.

1. INTRODUÇÃO

A globalização, entendida como a diminuição de barreiras econômicas e imigratórias entre os países, e caracterizada pelo aprofundamento das relações econômicas, sociais, culturais e políticas entre os povos do mundo, provoca diversas mudanças nos três setores da sociedade: governo, mercado e associações sem fins lucrativos.

As indústrias, por exemplo, migraram para regiões com baixo custo de mão de obra; seus produtos têm vida útil menor; e o valor das cargas aumentou, fomentando o crescimento do transporte de cargas.

No Brasil, o transporte rodoviário ainda é dominante no setor logístico, principalmente "em virtude de processos históricos e de vantagens diante de outros modais, como flexibilidade e facilidade de acesso aos pontos de embarque e desembarque, oferecendo um serviço porta a porta aos usuários" (CNT, 2021). No entanto, considerando as dimensões do país, com áreas isoladas dos centros urbanos, esse modo de transporte sofre inúmeros prejuízos devido, principalmente, à infraestrutura rodoviária brasileira que é escassa e de má qualidade, bem como à insegurança.

Nessa conjuntura, o transporte aéreo de cargas tem crescido, com um aumento de 7,2 % em relação ao ano passado (ANAC, 2022a), principalmente pela possibilidade de conectar de forma rápida e segura, regiões distantes e de difícil acesso, além de viabilizar o deslocamento de produtos sensíveis com baixo risco de perda ou danificação.

Paralelamente, com as medidas de restrição impostas pela Pandemia da Covid-19, as vendas virtuais deram um salto de quase 50% no faturamento, segundo a Neotrust, em decorrência do fechamento do comércio físico, da intensificação da vida doméstica e do uso da tecnologia para remediar o isolamento social.

A demanda por carga aérea só tende a crescer, considerando a produção industrial cada vez maior devido a globalização e a ampliação do comércio eletrônico, em decorrência do acesso à tecnologia e as facilidades dessa modalidade. Segundo a ANAC (2022b), o transporte aéreo de carga (montante de carga paga transportada por quilômetro, em quilos) movimentou 107,1 mil t, sendo destes 71,5% no âmbito internacional. Em consonância, no mercado doméstico, a movimentação sofreu um acréscimo de 15,5% em relação a 2021 e aumento de 104,8% referente a 2020. Portanto, vê-se a importância de investigar se os atores do processo estão preparados para suprir potenciais demandas e os fatores relacionados a isso.

Segundo Chen e Chou (2006) a busca por transporte aéreo de carga aumentou significativamente nos últimos anos, porque os ciclos de vida dos produtos diminuíram e a demanda por entrega rápida aumentou. Ademais, os estudos realizados até o momento focam principalmente no transporte de passageiros devido a restrições na disponibilidade de dados (GONG et al, 2017), e este busca preencher essa lacuna.

Baseando-se em Thomas Van Asch, Wouter Dewulf, Franziska Kupfer, Ivan Cardenas, Eddy Van de Voordeem (2020) que afirmam que o comércio eletrônico se tornou um verdadeiro divisor de águas no setor de carga aérea e deve ser o principal motor de crescimento nos próximos anos e no crescimento do e-commerce brasileiro. Com faturamento de mais de R$ 13,8 bilhões no e-commerce, janeiro de 2022 trouxe crescimento de 21% em relação ao mesmo mês de 2021 (R$ 11,5 milhões) para o setor no Brasil. O volume de compras on-line chegou a 31,1 milhões, 22% a mais que os 25,5 milhões de pedidos do ano anterior.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Transporte de Carga Aérea

O transporte aéreo, envolvendo o deslocamento de pessoas e mercadorias por aeronaves, é uma parte essencial da aviação. A história desse transporte, conforme Smith Jr (2002), começou no século XX, inicialmente com o envio de mala postal nos Estados Unidos e Grã-Bretanha, evoluindo gradualmente para voos internacionais após a Primeira Guerra Mundial. O desenvolvimento tecnológico após a Segunda Guerra Mundial e a globalização consolidaram o transporte aéreo de passageiros e cargas.

No Brasil, de acordo com Ferreira (2017), a aviação comercial teve início em 1927, com a criação das primeiras empresas aéreas, a Varig e o Sindicato Condor, ambas com assistência da empresa alemã Condor Syndikat. Atualmente, as principais companhias aéreas do Brasil, Latam, Azul e Gol, representam a grande maioria do transporte de passageiros, conforme a ANAC (2022a), com 99,6% do total de 6,8 bilhões de RPK.

Em relação ao transporte de cargas por via aérea, sua origem remonta à década de 1950, inicialmente como um subproduto do transporte de passageiros. Somente na década de 1970, tornou-se um negócio independente e lucrativo, diferenciando-se dos outros modos de transporte, como rodoviário, ferroviário e marítimo, que historicamente tiveram uma maior participação no transporte de cargas (CHEN; CHOU, 2006).

A demanda pelo transporte de carga aérea tem crescido consideravelmente, atingindo um marco significativo em agosto de 2021, com mais de 600 mil toneladas transportadas, de acordo com a ANAC.

O crescimento do transporte de carga aérea é impulsionado por uma série de fatores cruciais, como apontados pelo Transportation Research Board (TRB, 2015, conforme citado em LabTrans/UFSC, 2020). Esses fatores desempenham um papel fundamental na expansão contínua desse setor vital para a economia global.

Primeiramente, o crescimento econômico mundial é um motor essencial para o transporte aéreo de carga. A demanda por esse modo de transporte surge da necessidade de suportar o crescimento de diversos setores econômicos, garantindo a fluidez das trocas comerciais entre esses setores e os consumidores finais.

A globalização é outro fator preponderante. À medida que a economia global se torna mais integrada e menos protecionista, os fluxos de comércio internacional aumentam, impulsionando, por sua vez, o transporte aéreo de carga. A conectividade global exige uma logística eficiente, e o transporte aéreo desempenha um papel crucial nesse processo.

As estratégias empresariais também têm um impacto significativo. Empresas em todo o mundo estão adotando estratégias de estoque enxuto, como o just-in-time e make-to-order, como uma forma de obter vantagem competitiva. Para atender a essas estratégias, as empresas dependem do transporte aéreo para garantir entregas rápidas e pontuais aos clientes.

Por último, o comércio digital, ou e-commerce, tem desempenhado um papel cada vez mais relevante. O aumento das vendas online está transformando a dinâmica do comércio, tornando as entregas rápidas e eficientes uma prioridade. O transporte aéreo é a escolha preferida para atender a essa demanda crescente por entregas ágeis, impulsionando ainda mais o setor.

A pandemia da Covid-19 impulsionou consideravelmente as compras online, incluindo as internacionais, criando uma demanda global por entregas rápidas e eficientes. Nesse contexto, o transporte de carga aérea emerge como um campo da cadeia de suprimentos com amplo potencial de crescimento no mercado internacional. Esse crescimento é motivado pela necessidade de atender a uma demanda global em constante expansão, impulsionada por clientes que buscam não apenas qualidade, mas também flexibilidade de serviços, rastreamento em tempo real, garantia de integridade do produto e informações confiáveis (ADDE, 2022).

O transporte de cargas abrange dois setores distintos: remessas de pequenos volumes e o transporte de grandes volumes com finalidades comerciais. Segundo Figueiredo (2015), remessa refere-se ao transporte de pequenas encomendas, documentos e amostras. As remessas expressas são transportadas por empresas de frete courier, enquanto as remessas postais são conduzidas pelos Correios. Esse tipo de transporte oferece agilidade na entrega e redução da burocracia, mas possui limitações legais quanto ao tipo, peso, dimensões e valor do produto, além de não ser caracterizado como operação comercial.

Por outro lado, o transporte de grandes volumes com finalidades comerciais pode ser realizado em diferentes tipos de aeronaves. Aeronaves cargueiras são dedicadas

exclusivamente ao transporte de carga, com capacidade para carga unitizada no deque superior e no porão. Elas oferecem vantagens como baixo custo operacional, maior alcance em voos e menor consumo de combustível, tornando-se essenciais devido ao crescimento do e-commerce, que demanda entregas rápidas de mercadorias menores.

Além das aeronaves cargueiras, as companhias aéreas de passageiros também podem fornecer serviços de transporte de carga, aproveitando a capacidade ociosa no porão das aeronaves após o carregamento dos itens relacionados aos passageiros. Essa abordagem oferece flexibilidade de destinos, considerando voos frequentes de passageiros para várias localidades.

Aeronaves combinadas representam uma opção menos comum no Brasil, mas são aquelas que podem transportar passageiros e/ou carga, permitindo a rápida conversão entre as duas funções. Elas geralmente possuem portas de carga de grandes dimensões e recursos para adicionar ou remover assentos rapidamente (TRB, 2015).

O aumento anual de 1,33% na carga postal indica uma possível expansão da utilização do transporte aéreo para o transporte de produtos de comércio eletrônico, como observado pelo LabTrans/UFSC (2021), uma vez que esses tipos de carga são frequentes nas operações relacionadas ao e-commerce. Isso destaca o papel crescente do transporte aéreo na cadeia de suprimentos global, especialmente no contexto de compras online em crescimento constante.

2.2. E-commerce

O comércio eletrônico, abreviado como e-commerce, é uma forma de comércio online em que todas as transações de compra e venda de produtos e serviços ocorrem pela internet, através de canais digitais e dispositivos conectados, muitas vezes dispensando a necessidade de espaço físico. Durante a pandemia, o e-commerce cresceu significativamente como uma estratégia para pequenas e médias empresas enfrentarem a crise, mantendo suas vendas.

De acordo com uma pesquisa da BigDataCorp e PayPal, o e-commerce no Brasil teve um aumento notável em 2021, com quase 1,59 milhão de lojas online, representando um aumento de 22,05% em relação a 2020, quando já havia crescido 40%. Isso indica a criação média de 789 novas lojas online por dia no Brasil no último ano. O crescimento anual do e-commerce no país desde 2015 é de cerca de 23,69%.

Esse crescimento é resultado direto dos impactos da pandemia na economia e da necessidade de digitalização das empresas. Em 2020, os e-commerces com faturamento de até R$ 250 mil por ano representavam 48,06% do total, mas atualmente esse número subiu para 52,73%.

2.3. Inferência Estatística

Conforme afirmado por Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010), um conceito crucial a ser compreendido ao modelar informações provenientes de observações é a distinção entre modelos empíricos e mecanicistas.

Nos modelos mecanicistas, parte-se do pressuposto de que todos os fatores envolvidos no evento são conhecidos, e espera-se um resultado exato. Esses modelos normalmente se relacionam a fenômenos físicos, como a mecânica Newtoniana, que explica os fenômenos astronômicos não relativísticos como resultado de interações gravitacionais.

Já os modelos empíricos levam em consideração a incerteza das observações e os fatores que foram ignorados. Ao representar graficamente as observações empíricas, torna-se evidente que não é razoável modelar uma equação que se ajuste perfeitamente a todos os pontos, mas, em vez disso, esses modelos indicam uma tendência, uma curva simples na qual os pontos parecem se aproximar.

Como afirmado por Dantas (2012, p.71), "o objetivo da inferência estatística é tirar conclusões sobre parâmetros populacionais com base em estatísticas amostrais, por meio de estimação ou teste de hipóteses". A estimação pode ser pontual ou intervalar, enquanto os testes de hipóteses envolvem pressupostos e a obtenção de evidências a favor ou contra a hipótese.

As estimativas pontuais produzem um único valor como resultado, como quando estimamos a média populacional usando a

média aritmética da amostra. Em contraste, a estimação intervalar envolve a definição de um intervalo de confiança no qual a média tem uma probabilidade específica de estar contida.

De acordo com Dantas (2012), a estimação por intervalo está relacionada a uma distribuição de probabilidade. Além disso, os dados tendem a se concentrar em valores centrais, como a média, moda e mediana, que são conhecidos como estimadores de tendência central. Similarmente, estimadores de dispersão medem o quão distantes os dados estão do valor central. Exemplos dessas medidas incluem a variância, desvio padrão e o coeficiente de variação (CV). O CV é definido como a razão entre o desvio padrão e a média, sendo considerado baixo quando o CV é menor que 0,10, alto quando está acima de 0,30, e intermediário para os valores entre esses extremos, de acordo com Martins.

Dantas enfatiza que a distribuição de probabilidade é essencial ao estimar os parâmetros dos dados populacionais. Essas distribuições podem ser tanto discretas quanto contínuas, com exemplos de distribuições discretas incluindo a de Poisson, a Binomial e a Hipergeométrica, enquanto as distribuições contínuas incluem a Gaussiana, a distribuição t de Student e a distribuição de Snedecor.

A distribuição normal é uma das mais importantes, com a função densidade de probabilidade dependendo apenas de dois parâmetros: a média da população e o desvio padrão. Por outro lado, a distribuição t de Student é utilizada quando é necessário inferir sobre as médias populacionais sem conhecer os desvios padrão.

Quando se deseja testar a significância global dos modelos de regressão, a distribuição de Snedecor é extremamente útil. Ela permite verificar se a razão entre duas variâncias é estatisticamente diferente, de acordo com o nível de significância especificado.

A hipótese pode ser entendida como uma afirmação condicional sobre a população. Normalmente, uma hipótese nula, representada por $H0$, e outra alternativa, representada por $H1$, sendo uma o oposto da outra. O teste consiste em aceitar ou rejeitar uma hipótese estatística com base em elementos amostrais.

Martins (2008) aponta que ao realizar os testes, dois tipos de erro podem acontecer, quando se rejeita o que seria verdade e quando se aceita o que seria falso, o primeiro é nomeado de erro tipo I, enquanto o segundo, um erro tipo II. Sendo α a probabilidade de ocorrência do erro tipo I e β a probabilidade de ocorrência do erro tipo II.

Segundo Dantas (2012), o teste pode ser unicaudal ou bicaudal e para sua formulação é preciso de uma distribuição de probabilidade e um nível de significância estabelecido. Um exemplo de teste é o de t de Student, que acontece em cinco etapas:

1. Definir $H0$: $\beta 1 = 0$ e $H1$: $\beta 1 \neq 0$ ou $H1$: $\beta 1 > 0$ ou $H1$: $\beta 1 < 0$;
2. Fixar a probabilidade de erro α e escolher a distribuição t com grau de liberdade igual à n – 2, sendo n o tamanho da amostra;
3. Construir as regiões de aceitação (RA) e rejeição (RR) de acordo com a hipótese alternativa utilizada;
4. Calcular o valor da variável $tcal$ com base nos dados amostrais;

$$t_{cal} = \frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 / S_{xx}}}$$

5. Se $tcal$ estiver dentro da área de rejeição, então $H0$ será uma hipótese falsa e $H1$ será aceita como verdadeira.

Definido o modelo, pode-se verificar a qualidade deste a partir de outras análises, como a de correlação e determinação. Segundo Rodrigues (2012), a análise de correlação tem como objetivo a avaliação do grau de associação entre duas variáveis, ou seja, mede a "força" de relacionamento linear entre as variáveis.

Já Sartoris (2003, p. 47) afirma que "o coeficiente de correlação é obtido retirando-se o efeito dos valores de cada uma das variáveis sobre a variância", como pode ser visto na equação:

$$r = \frac{\sum(X_i - \hat{X})(Y_i - \hat{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \hat{X})^2 \sum(Y_i - \hat{Y})^2}}$$

Este coeficiente pode ser entendido como a medida da qualidade geral do ajustamento do modelo de regressão, pois

indica que proporção da variação do regressando, é explicada pela variável explanatória. O seu valor pode variar entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o ajustamento.

A palavra "regressão" foi utilizada pela primeira vez por Francis (1886) ao indicar que a média das alturas de pessoas filhas de pais altos era menor do que a média da altura de seus pais, e a média das alturas de pessoas com pais baixos era maior que a média da altura de seus pais, isto é, nos dois casos as médias partiam de extremos (pais altos e pais baixos) e regrediam a uma média populacional.

Porém, atualmente, regressão pode ser melhor descrita como o estudo da dependência de uma variável (variável dependente) em relação a outra ou a outras variáveis (variáveis explanatórias) visando estimar o valor médio da população (Gurajati, 2011).

Denomina-se então regressão linear quando essa relação tenta ser descrita por uma equação na qual os parâmetros não possuem expoentes diferentes de 1 e não aparecem multiplicados ou divididos por outros parâmetros, por exemplo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \cdots + \beta_n X_n + u$$

Onde Y é a variável dependente, $X1$, $X2$, ..., Xn são as variáveis explanatórias, $\beta 0$, $\beta 1$, $\beta 2$, …, βn são os coeficientes e u é o distúrbio.

Quando o modelo contém apenas uma variável explicativa, o processo é chamado de regressão linear simples, entretanto, o que ocorre na maioria dos casos é a regressão linear múltipla, quando possuímos mais de uma variável independente relacionada com a variável explicada.

Como esse processo é estocástico, sempre haverá esse erro (u) presente na estimativa. A regressão, portanto, consiste em encontrar os coeficientes que tornem esse erro o mais próximo possível de zero. Para isso, utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

Este, que além de MMQ, pode ser chamado de MQO (Mínimos Quadrados Ordinários) ou ainda OLS (do inglês Ordinary Least Squares), é a técnica de estimação mais amplamente utilizada na econometria. Partindo do pressuposto que um conjunto de dados pode ser explicado por uma função afim, busca-se encontrar essa função que melhor se ajuste ao conjunto.

Esse processo consiste em descobrir os coeficientes da equação de tal forma que minimize a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e o valor real observado, isto é, o distúrbio. Dessa forma, o grau do ajuste do modelo aos dados observados é maximizado.

Considerando a equação com apenas um regressor e a variável dependente, tal como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + u$$

Este processo pode ser realizado para qualquer quantidade de regressores, pois sempre se findará em um sistema de equações com k incógnitas e k equações, sendo $k - 1$ o número de variáveis independentes. Como a quantidade de coeficientes a serem descobertos é igual à quantidade de equações, o sistema possuirá uma solução única para o modelo, isto é, a função única que melhor se ajusta aos dados observados.

Porém, como o objetivo de encontrar esse modelo é fazer inferências a partir dele, entendendo e predizendo os valores relacionados ao mesmo, alguns requisitos precisam ser seguidos. Ao todo o modelo clássico de regressão linear está sustentado em sete hipóteses (Gujarati, 2011), são elas:

1. Embora não precise ser linear nas variáveis, a linearidade nos parâmetros é fundamental para o MMQ ser utilizado.
2. O termo erro e os regressores são independentes, isto é, o desvio não pode ser expresso em função das variáveis independentes e nem vice e versa.
3. $E(ui \mid Xi) = 0$ que pode ser definido como o valor médio ou esperado do termo de erro aleatório é zero dado o valor Xi
4. A variância ou dispersão do desvio é a mesma independentemente do valor das variáveis regressoras. Esta pode ser chamada da hipótese de homocedasticidade
5. Não há autocorrelação entre os termos de erro, isto é, o desvio entre um dado

observado e o valor estimado não está relacionado com outro desvio de outros dados.

6. O número de parâmetros a serem estimados deve ser menor que o número de observações.
7. Não deve haver valores discrepantes em relação aos demais na amostra e nem os valores observados precisam ter certa variabilidade entre os regressores, pois com valores iguais o modelo se tornaria limitado aos mesmos.

Nem sempre é possível observar uma variável de interesse e, portanto, se utiliza variáveis proxy, isto é, variáveis que representam outras. Já que a quantidade de produtos provenientes do e-commerce, transportados por vias aéreas, não é um dado disponível ou diretamente observável, faz-se necessário a utilização de alguma variável intrinsecamente relacionada com a mesma.

Como afirma LabTrans/UFSC (2021), os itens cadastrados como carga postal são em sua maioria produtos relacionados ao comércio eletrônico, e, portanto, supõe-se que este volume de mala postal seja um bom representante para a variável em questão.

Variáveis dummy são regressores binários, isto é, assumem o valor de 0 ou 1. Normalmente é um artifício inserido pelo pesquisador para representar variáveis qualitativas ou classificativas, já que não necessariamente são coletados dessa forma.

Neste trabalho será usada para indicar que o mês da observação se refere ao mês de novembro, nesse caso a variável terá o valor 1 e nos demais meses, o valor 0.

3. METODOLOGIA

A pesquisa é classificada com base em seus objetivos, natureza, abordagem ao problema e procedimentos técnicos. Segundo Gil (2002), a pesquisa descritiva busca estabelecer relações entre variáveis, tornando esta pesquisa descritiva em termos de objetivos, pois procura relacionar a demanda de carga aérea com o volume de vendas pelo e-commerce brasileiro.

Quanto à sua natureza, este trabalho é considerado pesquisa aplicada, pois se concentra na aplicação e desenvolvimento de modelagem matemática com dados reais da ANAC e Neotrust, utilizando estatísticas e, mais especificamente, regressão linear.

A escolha da base de dados limitou-se aos anos de 2018 a 2021 devido à confiabilidade dos dados mais recentes e à complexidade de incluir fatores adicionais em um modelo mais abrangente. Isso resultou em uma amostra populacional suficientemente grande para análises estatísticas. A abordagem ao problema é quantitativa, pois as etapas da pesquisa se baseiam em técnicas estatísticas, incluindo a regressão linear e testes de linearidade.

Os dados utilizados para esta pesquisa provêm das companhias aéreas registradas pela ANAC e foram disponibilizados através do portal Hórus. A base de dados foi tratada para eliminar registros com aeródromos de origem e destino idênticos, bem como voos classificados como "não se aplica" e "improdutivo". As informações na base de dados incluem campos como "ICAO", "Aeródromo", "Município/UF", "Ano", "Mês", "Tipo de voo", "Passageiro (un)", "Aeronave (un)", "Carga Aérea (kg)", "Mala Postal (kg)", "Grupo de Voo" e "Sentido".

"ICAO" refere-se ao código internacional de aeródromos. "Tipo de voo" pode ser doméstico ou internacional, dependendo da presença de aeródromos brasileiros como origem e destino. "Passageiro (un)" representa o número total de passageiros a bordo, enquanto "Aeronave (un)" refere-se ao número total de movimentações no aeroporto. "Carga Aérea (kg)" é a quantidade total de carga transportada em quilogramas, excluindo correio e bagagem, enquanto "Mala Postal (kg)" refere-se à quantidade de objetos transportados pela rede postal em cada trecho de voo. "Grupo de Voo" pode ser regular ou não regular, e "Sentido" refere-se ao embarque ou desembarque.

Após a coleta e tratamento dos dados, a próxima etapa envolve uma análise exploratória, que busca estabelecer relações entre variáveis, examinar a evolução ao longo do tempo e estudar as características dos dados antes de aplicar métodos estatísticos.

4. RESULTADOS

De início, ao observar o volume mensal de passageiros transportados entre janeiro de 2018 e junho de 2022, percebe-se duas características importantes: os picos nos meses de janeiro, julho e dezembro, e a considerável queda na movimentação de passageiros a partir de fevereiro de 2020.

É possível observar duas características principais: os picos nos meses de janeiro, julho e dezembro, que coincidem com as férias escolares, e a queda acentuada a partir de fevereiro de 2020, devido à pandemia de Covid-19 que restringiu as viagens internacionais e domésticas e estava se espalhando globalmente naquela época. Em novembro de 2019, ocorreu a primeira infecção pelo SRA-CoV-2, também conhecido como Covid-19, em um ser humano, na cidade de Wuhan, província de Hubei, China. A doença é uma infecção respiratória aguda causada pelo betacoronavírus, que é altamente transmissível e se espalhou globalmente, infectando quase 600 milhões de pessoas em todo o mundo e causando cerca de 6,5 milhões de mortes.

Em 26 de fevereiro de 2020, o primeiro caso da doença foi confirmado no Brasil, na cidade de São Paulo, em um homem de 61 anos, de acordo com o Ministério da Saúde brasileiro. Isso coincidiu com a disseminação do vírus em todo o mundo, e em 11 de março de 2020, a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou a pandemia global. Como resposta, muitos países ao redor do mundo fecharam suas fronteiras, o que teve um impacto direto na paralisação das operações de transporte aéreo.

Os efeitos dessa situação foram evidentes em várias áreas do mercado de transporte aéreo. A demanda doméstica, medida em passageiros quilômetros pagos (RPK) para voos nacionais, diminuiu significativamente, com uma redução de 93,1% em abril de 2020 em comparação com abril de 2019. Essa queda na demanda era esperada devido à implementação da Malha Aérea Essencial, que reduziu a oferta de voos no país em 91,6%. Em março, quando as primeiras medidas de isolamento e fechamento de fronteiras foram anunciadas, a demanda doméstica por voos já havia registrado uma redução de 32,9% (ANAC, 2020b).

Ao analisar essas informações separadamente por regiões do Brasil, fica evidente que a região Sudeste lidera em termos de movimentação de passageiros, respondendo por cerca de 50% do total. Em segundo lugar está a região Nordeste, seguida pela região Norte. É interessante observar que há picos de movimentação nos meses de janeiro, julho e dezembro em todas as regiões, mas esses picos são mais pronunciados na região Sudeste e Nordeste. Isso pode indicar um aumento nas viagens internacionais e para as praias do Nordeste durante os períodos de férias.

Em relação à carga aérea esse mesmo comportamento é observado, porém o impacto da pandemia foi menor, tanto na redução da demanda quanto na recuperação da mesma a valores normais. Além do fato do volume de carga aérea já ter se recuperado após a pandemia, percebe-se que o volume de carga internacional ultrapassou o de carga doméstica após o período pandêmico.

Em algumas regiões, como Manaus e Campinas, o volume de carga aérea, tanto doméstica, quanto internacional, aumentou significativamente após a pandemia. Já em Recife, esse aumento foi observado apenas para cargas domésticas e em Guarulhos, o inverso, apenas cargas internacionais cresceram após a pandemia.

Assim como a carga aérea, a mala postal se recuperou bem da pandemia, e a queda na movimentação não foi tão acentuada como no caso do volume de passageiros. No cenário nacional é perceptível que a demanda vem diminuindo com o passar do tempo, porém, em algumas capitais do Nordeste e do Norte, o volume de mala postal transportado em 2021 foi maior que em 2019. No caso de Recife, por exemplo, esse aumento é observado tanto em voos domésticos como internacionais. Já em Manaus, o volume em plena pandemia foi acima que no ano anterior, 2019.

No caso do e-commerce, a base de dados analisada foi a da Neotrust, empresa voltada para coleta de dados do e-commerce brasileiro e estudo de soluções para parceiros do comércio eletrônico, dos anos de 2018 a 2021. A partir dessas informações, foi plotado o

gráfico abaixo, do índice de faturamento e de vendas do comércio eletrônico do Brasil.

Fica evidente que tais índices vêm crescendo no período observado, de janeiro 2018 a dezembro de 2021, que os meses de novembro são os mais importantes para o setor e como a pandemia teve influência na demanda por produtos ofertados de forma online.

Essas observações são fortalecidas através dos resultados encontrados pela regressão linear dessas variáveis. O índice de faturamento do e-commerce no período é utilizado como variável dependente, a taxa de câmbio, o PIB corrente, os números de casos de covid-19 são utilizados como variáveis explicativas, além de variável dicotômica para considerar o comportamento atípico no mês de novembro. O modelo pode ser observado abaixo pela Equação (1) e em seguida o quadro com o detalhamento das estatísticas do mesmo.

$$\hat{Y} = -243 - 0{,}0003 \times CÂMBIO + 0{,}0074 \times COVID + 0{,}0006 \times PIB + 132 \times NOV \quad (1)$$

Tabela 1 - Coeficientes do modelo sobre o índice de faturamento do e-commerce. Fonte: Adaptado de ANAC (2022).

Estatística de Regressão		*ANOVA*	
R^2	83%	***F***	***Significância***
R^2 ajustado	81%	50,7	9,88E-16
Coeficientes		***Stat t***	***valor-P***
INTERSECÇÃO	-242,65	-3,12	3,25E-03
CÂMBIO	-0,0003	-5,21	5,07E-06
CASOS DE COVID	0,0074	5,21	5,14E-06
PIB CORRENTE	0,0006	4,82	1,82E-05
NOVEMBRO	132,35	6,21	1,78E-07

Como indicado pelo R^2 ajustado, conseguimos explicar 81% da variabilidade do índice de faturamento no período. Através do valor-P, podemos verificar que todas as variáveis independentes são significantes para o modelo ao nível de 99%, isto é, com 99% de certeza podemos afirmar que a taxa de câmbio é importante para predizer o índice de faturamento do e-commerce brasileiro, da mesma forma para o número de Casos de Covid, para o PIB corrente, e para a variável dicotômica representante de novembro.

Além disso, esse modelo como um todo possui uma significância de 99%, o que pode ser interpretado como que é melhor predizer o índice de faturamento por esse modelo do que simplesmente estimá-lo pela sua média.

Considerando este estudo e mantendo todas as demais variáveis constantes, à medida que a razão entre o dólar e o real aumenta em 1, o índice de faturamento cai 0,0003 pontos. Da mesma forma, mantendo as demais variáveis constantes, a cada 1.000 novos casos de covid-19, o índice aumenta 7,4 pontos, e a cada R$ 1.000.000,00 de aumento do PIB, o índice aumenta 0,0006 pontos, além de que nos meses de novembro o índice faturamento é em média 132,35 pontos acima que nos demais meses.

Ao analisar, o mesmo gráfico do índice de faturamento com o índice de vendas no decorrer do tempo, porém com os dados agrupados por ano, percebemos que a partir de 2020 a razão entre o faturamento e as vendas vem caindo, isto é, o ticket médio dos produtos comercializados em 2020 e 2021 é menor do que em épocas antes da pandemia.

Nota-se, portanto, que a comercialização através do e-commerce vem crescendo e que a pandemia teve forte influência positiva para as vendas. Ademais, a mala postal também apresenta aumento da movimentação nos principais destinos em que os produtos do e-commerce são transportados por vias aéreas.

Com isso, e com o indicativo pela revisão bibliográfica de que os principais produtos cadastrados como mala postal são de origem do e-commerce, foi utilizado a mala postal como proxy para o volume de produtos do e-commerce transportados pelo modal aéreo.

O modelo pode ser observado abaixo, no qual confirma que a mala postal tem importância para predizer a carga aérea brasileira.

O modelo pode ser observado abaixo Equação (2) e em seguida o quadro com o detalhamento das estatísticas do mesmo.

$$\hat{Y} = -54.766.253 + 5 \times MP - 1899 \times COVID + 194 \times PIB \quad (2)$$

Tabela 2 - Coeficientes do modelo sobre o volume de carga aérea. Fonte: Adaptado de ANAC (2022).

Estatística de Regressão		*ANOVA*	
R^2	66%	***F***	***Significância***
R^2 ajustado	64%	28,95	1,71E-10
Coeficientes		***Stat t***	***valor-P***
INTERSECÇÃO	5,5E+07	-2,35	2,34E-02
MALA POSTAL	5,02	6,30	1,24E-07
NÚMERO DE CASOS COVID	1899,19	-4,46	5,63E-05
PIB CORRENTE	193,66	5,53	1,63E-06

Como pode-se observar pelo valor-P, todas as variáveis independentes são significantes para o modelo ao nível de 99%, exceto a intersecção que é significante ao nível de 95%, isto é, com 99% de certeza podemos afirmar que a Mala Postal é importante para predizer a demanda de Carga Aérea, da mesma forma para o Número de Casos de Covid e para o PIB corrente.

Ademais, esse modelo como um todo possui uma significância de 99%, o que pode ser interpretado como que é melhor predizer a carga aérea por esse modelo do que simplesmente estimá-la pela sua média. Entretanto, a variabilidade do volume de carga aérea, na amostra utilizada, é explicada apenas em 64%, isto é, precisa-se de mais variáveis independentes para justificar a demanda por carga aérea com mais assertividade, e ao incluir mais parâmetros no modelo, o valor dos coeficientes atuais pode sofrer certa oscilação.

Considerando o modelo deste estudo e mantendo todas as demais variáveis constantes, à medida que o volume de Mala Postal cresce em 1 kg, o volume de Carga Aérea aumenta 5 kg. Da mesma forma, mantendo as demais variáveis constantes, a cada novo caso de covid, o volume de carga aérea transportada cai cerca de 1900 kg, e a cada R$ 1.000.000,00 de aumento do PIB, o volume de carga aérea aumenta em quase 200 kg.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No cenário nacional, a carga aérea não apresenta crescimento, porém em regiões específicas, como Manaus, Salvador e Recife, predominantemente Norte e Nordeste, apresenta tal crescimento, o que pode estar associado ao transporte de e-commerce para essas regiões que tem sido o foco das plataformas de comércio eletrônico, já que reduzindo o tempo de entrega, aumenta o volume de vendas.

Conclui-se que o e-commerce está procurando outras alternativas para o envio de mercadorias além da realizada pela Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos, CORREIOS. Para grandes volumes de entregas diárias, contratos com outras transportadoras podem ser mais vantajosos, além de que marketplaces, como o Mercado Livre, possuem companhias aéreas próprias.

Além de que entre os "Produtos industrializados" e "Máquinas e eletrônicos", é possível identificar um volume expressivo de cargas provenientes de e-commerce, como calçados, roupas, acessórios, utensílios domésticos, equipamentos de informática e eletrodomésticos.

Como boa parte desses produtos provenientes do e-commerce estão sendo registrados diretamente como carga aérea é provável que a influência do comércio eletrônico na carga aérea tenha sido subestimada no último modelo apresentado.

Além disso, ao se analisar o comportamento das empresas de e-commerce, percebe-se um investimento no transporte aéreo para entrega de produtos em longas distâncias, com o objetivo de reduzir esse tempo de entrega para dois dias na maior parte do país.

Possíveis trabalhos futuros podem ser desenvolvidos a partir dessa temática, considerando que ainda é pequeno o número de trabalhos brasileiros sobre o tema e há várias possibilidades de aprofundamento. Uma dessas opções é fazer uma análise regional ou até mesmo por aeroporto, assim como investigar melhor os tipos de cargas para diferentes rotas.

Foi observado também que grandes plataformas de e-commerce, como o Mercado Livre, possuem parcerias com certas companhias para transporte dos seus produtos. Analisar essas companhias em específico pode trazer maiores informações sobre a influência do comércio eletrônico na carga aérea.

REFERÊNCIAS

ADDE, T. O que é frete aéreo e como ele funciona?. 2022.Artigo disponível em: <www.nuvemshop.com.br/blog/frete-aereo>. Acesso em: 01 agost 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC), Brasília-DF. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/todos-osdados-abertos>. Acesso em: 25 de jul 2022

ALECRIM, E. Mercado Livre usará aviões da Gol para acelerar entregas em todo Brasil. Disponível em: <https://tecnoblog.net/noticias/2022/04/19/mercado-livre-usara-avioes-da-gol-para-acelerarentregas-em-todo-o-brasil> Acesso em: 21 agost 2022

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010

BRASIL. Ministério da Infraestrutura (MInfra). Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC). Desempenho. [Brasília, DF], 2022a. Disponível em: <https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/?auth=s#Movimentacao/Desempenho> . Acesso em: 6 jul. 2022.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura (MInfra). Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC). Desempenho. Brasília-DF, 2022b. Disponível em: <https://horus.labtrans.ufsc.br/api//Files/CargaAerea/>. Acesso em: 6 jul. 2022.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura (Minfra). Secretaria Nacional de Aviação Civil (SAC). Sistema Hórus. Versão 9.5.13.307. Brasília, DF, 2020c. Disponível em: <https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Principal>. Acesso em: 19 jun. 2020.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Programa de Disseminação das Estatísticas do Trabalho (PDET). Novo CAGED – Maio 2022. [Brasília, DF], 2022c.Disponível em: http://pdet.mte.gov.br/novo-caged. Acesso em: 6 jul. 2022.

BIGDATACORP. Perfil do E-Commerce Brasileiro, 7ª edição da pesquisa, disponível em <https://bigdatacorp.com.br/estudo-perfil-do-e-commerce-brasileiro-7a-edicao/>. Acesso em: 21 ago. 2022.

CHEN, C. H, CHOU S. Y. A BSC Framework for Air Cargo Terminal Design: Procedure and Case Study. Journal of Industrial Technology Volume 22, Number 1 - January 2006 through March 2006, disponível em: <https://www.iastatedigitalpress.com/jtmae/articles/>. Acesso em 30 maio 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE (CNT). Agenda institucional transporte e logística 2022. – Brasília: CNT : SEST SENAT : ITL, 2022. Disponível em: <file:///C:/Users/Nadjane/Downloads/Agenda%20Institucional%20Transporte%20e%20Log%C3%ADstica%202022.pdf> Acesso em : 10 ago de 2011

Congresso Brasileiro de História Econômica,XII & Conferência Internacional de História de Empresas, 13ª, 2017, Niterói,RJ. Um breve histórico da aviação comercial brasileira Josué Catharino Ferreira, disponível em: <https://www.abphe.org.br/arquivos/josue-catharino-ferreira.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2022

DANTAS, R. A. Engenharia de avaliações: uma introdução à metodologia científica. São Paulo: Pini, 2012.

FIGUEIREDO, R. M. A de. Um estudo de localização de “HUBS” no transporte aéreo de cargas brasileiro. Rafael Mesquita Antunes de Figueiredo; orientador: Nélio Domingues Pizzolato. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Industrial, 2005. 89 f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial.

GALTON, F. “Family likeness in stature”. Proceedings of Royal Society. Francis Galton - Londres, 1886. v. 40, p. 42-72

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002

Gurajati, D. N. Econometria Básica Damodar N. Gujarati 5 edição 2011

LABTRANS/UFSC. Carga Aérea. Vol 1. Florianópolis, 2020

MARTINS, Gilberto de Andrade. Estatística geral e aplicada. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008

RODRIGUES, S. C. A. Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações, tese dedissertação. Universidade da Beira Interior - Portugal, disponível em: <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/1869/1/Tese%20Sandra%20Rodrigues.pdf> acesso em: 01 de maio de 2022

RONDINELLI, J.; GONÇALVES, G. e FREITAS, G. Quem vai entregar mais rápido. Revista E-commercebrasil, disponível em <https://revista.ecommercebrasil.com.br/revistaAnteriores/65>. Acesso em: 20 ago. 2022

SARTORIS, A. Estatística e introdução à econometria. São Paulo: Saraiva, 2003

SMITH JR, M. J. The Airline Encyclopedia 1909-2000. The Scarecrow Press, Inc. Lanham, Maryland, and Oxford 2002. Disponível em <https://cloudflareipfs.com/ipfs/bafykbzacebdrowp5wujcjc37xikyoxfcerdofba326u2rig6o6el7ev5bch4i?filename=Myron%20J.%20Smith%20Jr.%20-%20The%20Airline%20Encyclopedia%201909-2000%20%283%20vol.%20set%29-Scarecrow%20Press%20%282002%29.pdf> Acesso em: 01 jun. 2022

CHALLENGING NOISE CONTOURS AS AN EFFECTIVE MEANS FOR MANAGING AIRPORT NOISE CONFLICTS WITH COMMUNITIES: QUANTIFYING PEOPLE AFFECTED BY SÃO PAULO'S AIRPORTS

Luiz Henrique Werneck de Oliveira
Zukunft Consulting, Ltd.

*** Corresponding author e-mail address**: luizwerneck64@gmail.com

PAPER ID: SIT2248

ABSTRACT

Aircraft noise around airports is a major urban nuisance, affecting human health and school-children's performance. São Paulo, Brazil, has 12 million people within a macro metropolis of 33 million. Its three major airports processed 76.2 million passengers and 623.7 thousand aircrafts' movements in 2019. Their most recent noise contours date from 2017-2019 but the number of people, dwellings, schools, and health units affected by more than 65dB was not properly accounted for. This paper overlays noise contours to population census data to estimate such impacts. It was found the from 300,000 to half a million people currently live within 65dB and 75dB contours, depending on the estimating rationale, as one of the major airports closes at night, thereby distorting its 24-hour average noise contour. It thereby challenges the use of noise contours for evaluating airport effects in cases of dense urban communities with busy airport systems, indicating potential future improvements.

Keywords: Airport Noise, São Paulo's Airports, Urban Impacts, Noise Contours.

Acknowledgements: The author would like to thank Ms. Gabriela Romagnolo for her assistance with the GIS overlays, image development and counting of the social infrastructure elements within the noise contours, as well as Professors Silvana Zioni and Jeroen Klink, of Federal University ABC, Brazil, for the stimulus to publish these partial results of the author's Ph.D. Thesis as a stand-alone article.

1. INTRODUCTION

Aircraft noise around airports is a major urban nuisance, affecting human health (Babish, 2005; Bronzaft, 2000; Stansfeld *et al*., 2000) with effects such as hypertension and sleep disturbances (Spreng, 2004; Jarup *et al*., 2008; Roselund *et al*., 2001) and schoolchildren's performance in terms of cognitive and mnemonic capacity (Hygge *et al*., 2002; Evans *et al*., 1998; Evans and Maxwell, 1997).

São Paulo is the largest city in Brazil, with 11.5 million people. It leads a metropolitan area of 21.5 million people and gathers other surrounding five metropolitan areas totaling 32.5 million people, 83% of São Paulo's state GDP and over 28% of Brazil's GDP (DAEE, 2013).

São Paulo's macro metropolitan area is served by 3 major airports, with a total of 76.2 million passengers and 623.7 thousand aircrafts' movements in 2019. This airport system is led by São Paulo-Guarulhos International Airport (GRU/SBGR), with 43 million passengers and 291,987 aircraft movements in 2019, followed by São Paulo-Congonhas domestic airport (CGH/SBSP), with 22.61 million passengers and 217,254 aircrafts movements, and Campinas-Viracopos International Airport (VCP/SBKP), with 10.58 million passengers and 114,459 aircraft movements in 2019 (Werneck de Oliveira, 2022a).

Like in most world-wide airports, this patronage was severely affected by the SARS-COV-2 Pandemics, but they are quickly recovering their pace: Campinas-Viracopos had its best year ever in 2022, São Paulo-Guarulhos reached 80.2% of its pre-pandemic record of passengers of 2019, and São Paulo-Congonhas recorded 79.7% of the 2019 passengers' record.

São Paulo-Congonhas occupies an urban-locked relatively small site (1.65km^2), while São Paulo-Guarulhos occupies a much larger site, (11.9km^2), but also surrounded by urban development preventing it to expand its runway system. Campinas-Viracopos has a larger site (17.66km^2) and is the only of these airports that can expand its runway system. However, as it is 90km away from São Paulo, it is unlikely to be a commercial alternative for the future of the three-airport system, which tend to concentrate air traffic to their saturation limits, affecting more people in neighboring areas.

Developing noise contours is the most common methodology to indicate the "noise footprint" of large airports, but this practice has been challenged as it uses artificial calculations (even when supported by continuous noise monitoring) which neglects single events noise peak levels, and because significant numbers of people living outside these contours claim to be adversely affected by airport noise (Cidell, 2008).

The concept of developing noise contours to ease the airport x cities conflict was introduced in Brazil in 2011 by the National Civil Aviation Agency, ANAC (2011). At that time, a discussion regarding adopting the 55dB European standard versus the North American 65dB standard was held, with the latter prevailing in the outcoming regulations, such as RBAC #161 (ANAC, 2019). This regulation sets rules for noise insulation of buildings and the compatibility of airport noise with schools and health units; however, the effects of these situations are not estimated in terms of number of people or dwellings affected, or schools or health units within such contours; thereby these rules are not dully enforced.

These three airports' more recent noise contours date from 2017 to 2019 but the number of people affected by more than 65dB was not accounted for, nor the number of schools and health units affected was ever identified.

The main purpose of this paper is to quantify the number of people, schools and health units located within the 65dB and 75dB contours of these three airports. A secondary objective is to discuss the adequacy of using noise contours based on 24 hours daily average noise for a major airport that closes at night (thereby not generating any noise during the hours when there are no operations).

The original noise contour discussion of 2011 indicated 31,210 people affected by São Paulo-Congonhas in the 65dB contour, only 252 people within the 75dB contour but an astonishing number of 313,431 people within the 55dB contour (estimates considering the 2010 population census versus the 2010 landings and take-offs and fleet mix.

After it was decided to drop the 55dB contour to enforce only the 65dB and the 75dB noise contours (following North American

Standards rather than European Directives), these airports developed their most recent 65dB- and 75dB-only noise contours in 2017 (Campinas-Viracopos), 2018 (São Paulo-Congonhas), and 2019 (São Paulo-Guarulhos airport), but none of these airports and their authorities estimated the number of people, houses, schools, and health units located within these noise contours.

Furthermore, such noise contours are not available at the airports' websites; rather, they are published on the Brazilian Regulatory Agency of Civil Aviation website (ANAC), making it difficult for citizens to access such information and to file complaints of excessive noise events affecting them.

This lack of follow-up of the existing rules based on the ANAC's RABC-161 (ANAC, 2019) creates a gap of noise impact evaluation that prevents common public to have a better understanding of their potential health and life quality effects from being or living relatively close to these airports or under their approach and departure paths. This justify this paper's purpose to quantify these numbers and discuss the fact that 24-hour daily average may not be the best approach for a major airport as São Paulo-Congonhas, which closes at 11:00PM and resume operations at 6:00AM the following morning.

2. METHODOLOGY

This article uses georeferenced data of the 2010 Brazilian population census split into census sectors overlayed to these three airports' more recent noise contours to estimate the number of people, dwellings, schools, and health units within their respective 65dB and 75dB noise contours (and for 2011 55dB noise contour in the case of São Paulo-Congonhas Airport).

Airport movement data of passengers' movements and aircraft movements (used for the context of Item 1 above) came from São Paulo-Guarulhos and Campinas-Viracopos airports' websites; in the case of São Paulo-Congonhas data came from Brazil's national airport company INFRAERO, all for 2019 and 2022.

All population and dwellings data were obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE in its Portuguese acronym) for the 2010 census (it is noteworthy that the 2020 Census was postponed to late 2022 due to the SARS-COV-2 Pandemics and its results have not yet been fully published in terms of georeferenced sectors).

Population and dwellings data were obtained in shapefiles for each 2010 census sector within all affected urban districts, respectively for total resident population (not accounting temporary tenants), and private dwellings permanently occupied. This excluded non-permanent residents (*e.g.*: temporary, non-resident conditions) and empty houses (vacant, abandoned, under construction or under demolition) as well as non-permanent uses such as hotels, motels, commercial and institutional buildings (with schools and health units computed separately, as addressed below).

The number of schools and health units was obtained from São Paulo State's Statistical Foundation (SEADE, 2020), with additional data of health units within the City of São Paulo coming from the municipal georeferenced database (GEOSAMPA, 2020).

The schools' data considered privately-owned schools (covering all children's ages and grades), municipal schools (pre-school and up to 9th grade-equivalent), state schools (high-schools for teenagers at 10th to 12th grades), as well as under-graduation schools (public and privately-owned universities and colleges). All these types of schooling units and services had their address and georeferenced location.

Health units considered follow the Brazilian public- and private- health services' structures which separate the typology of unit and service according to the complexity of the cases serving specific catchment areas. This includes simpler units such as Basic Health Units (UBS in its Portuguese acronym of namely "*Unidade Básica de Saúde*"), followed by Emergency Units (UPA in its Portuguese acronym of namely "*Unidade de Pronto Atendimento*"), and at last, full-service hospitals, split into public (typically municipal but at times kept by the state or federal government) and privately-owned hospitals. Neither UBS nor UPA have rooms for overnight stays by patients, although both operate 24-hours, seven days per week, year-round. Hospitals, otherwise, may have emergency wards (as UPA), medical consultation rooms (as UBS), but also infirmaries, patient rooms, and surgery centers.

Information of interest (areas, population, dwellings, all types of schools and of health units) were superposed onto the airports' most recent noise contours. Such overlay employed Quantum Geographical Information System (GIS) version 3.24. Quantum-GIS (or simply QGIS) is an open software with public, anonymously developed plug-ins. Overlays used clipping and joining tools of areas within and outside each of the census sectors partially inserted in the noise contours limits. Census sectors fully within the noise contours had their data fully computed, but further clipped and rejoined, as necessary, to segregate data from the 65dB and the 75dB noise contours as appropriate.

The total area of census districts within the noise contours' limits were calculated using the clipped and/or rejoined shapefiles' polygons, while the number of people and dwellings within and outside the noise contours limits was a pro-rata of the total data of each census sector related to its total area. Thereby only the portions within the noise contours had their data considered (as census sectors limits do not coincide with the georeferenced noise contours).

Population and dwellings data as well as all types of schools and health units were computed in their shapefiles according to being within either the 65dB or the 75dB contour, by each individual subdistrict with indication of the area, total resident population, and total permanent and occupied dwellings of the 2010 census.

Schools were also computed by subdistricts and each type of school, with a total for each subdistrict. All data had their subtotals summed for each noise contour (65dB and 75dB subtotals). The same procedure was done for all health units. The opening of data by subdistricts allows identifying whether the area of influence is aligned to each runway heading where different urban typologies can be found.

São Paulo-Congonhas (runways 17R-35L and 17L-35R) has higher income, high-rise apartments towards its Northwest and lower-income including dense slums towards Southwest. Campinas-Viracopos (15-33 sole runway) has a mix of low income and high-density slums and low-density peri-urban plots toward Southeast, low-income plots along the runway, and rural areas towards Northwest. São Paulo-Guarulhos (runways 10L-28R or 10R-28L) has both low-income slums and higher income and high-rise buildings (Guarulhos City center) towards West and stretches of low-income high-density slums towards East. This allows computing how these relatively different communities are affected in terms of noise affecting the number of people, houses, schools, and health units.

3. RESULTS

Due to increased passengers and aircraft patronage from the more recent (2017-2019) contours against 2011, the number of people within the 65dB in São Paulo-Congonhas increased to 70,216 people and that within 75dB to 1,704 people. As for Campinas-Viracopos, there were 24,494 people within the 65dB contour and 620 within the 75dB one. In São Paulo-Guarulhos, however, the number of people within the 65dB contour amounts 203,030 inhabitants, and that within 75dB contour reaches additional 11,317 people.

The preliminary results of the 2022 census (postponed from 2020 due to the Pandemics) indicated that total population number of São Paulo grew to 11.5 million inhabitants, while Campinas' population grew to 1.2 million inhabitants, and Guarulhos, to 1.4 million. Hence, the number of people affected may be further increased, re-fueling the airport x community conflict.

Moreover, overlaying the 2010 Census data onto these airports' noise contours allowed estimating the number of schools (private, public-municipal, public-state and both public and private universities), as well as health units (basic aid units, emergency, and public and private hospitals) located within these airports' 65dB and 75dB noise contours, both as totals and as by these cities' districts.

Figure 1 shows the overlay of 2010 population census data sectors with the São Paulo-Guarulhos 65dB and 75dB noise contours, while Figure 2 does the same for São Paulo-Congonhas airport, and Figure 3 does the same for Campinas-Viracopos Airport. In the sequence, Tables 1, 2 and 3 summarize the data on the different headings of the three airports, including 55dB noise contours for 2011 of São Paulo-Congonhas Airport and 2017-2019 65dB and 75dB contours for all airports.

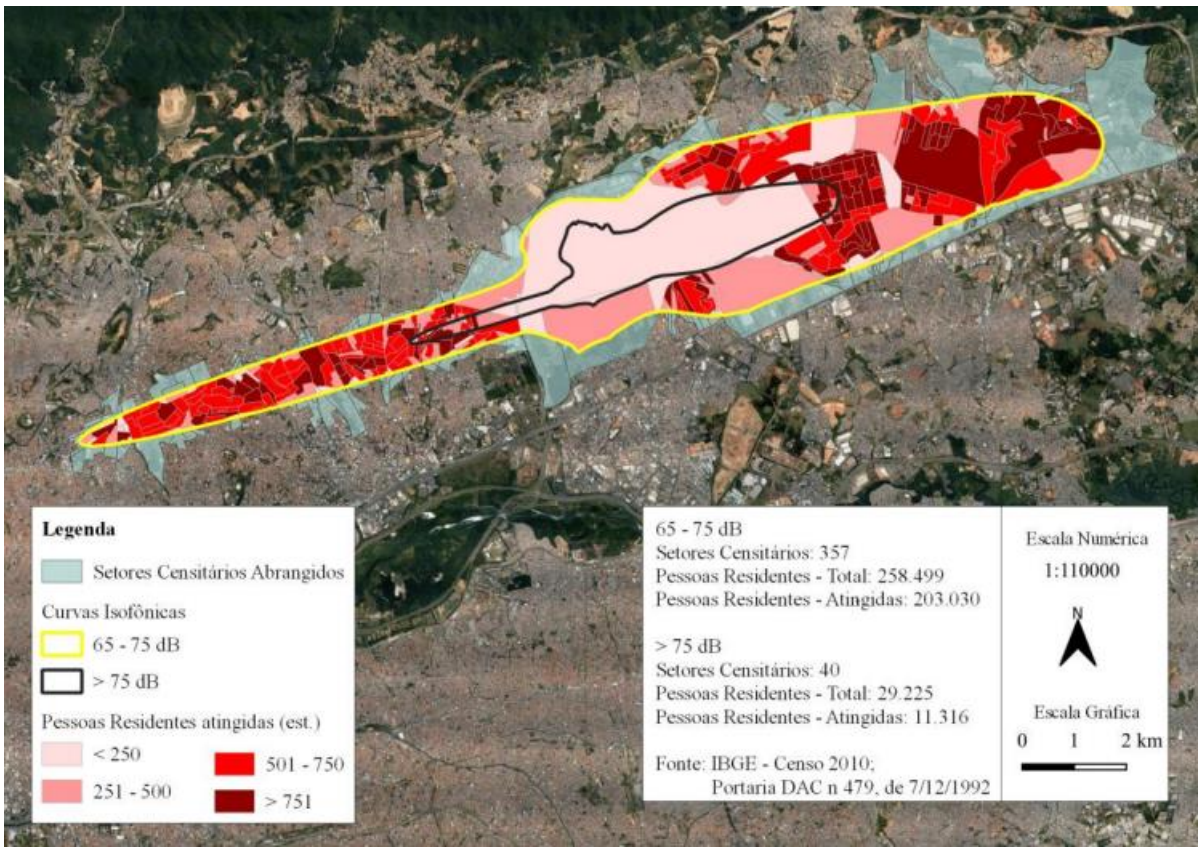


Figure 1 Overlay of 2010 Census Districts and São Paulo-Guarulhos 2019 Noise Contours

Source: Prepared by the author, based on IBGE (2010) and GRU-AIRPORT (2019)

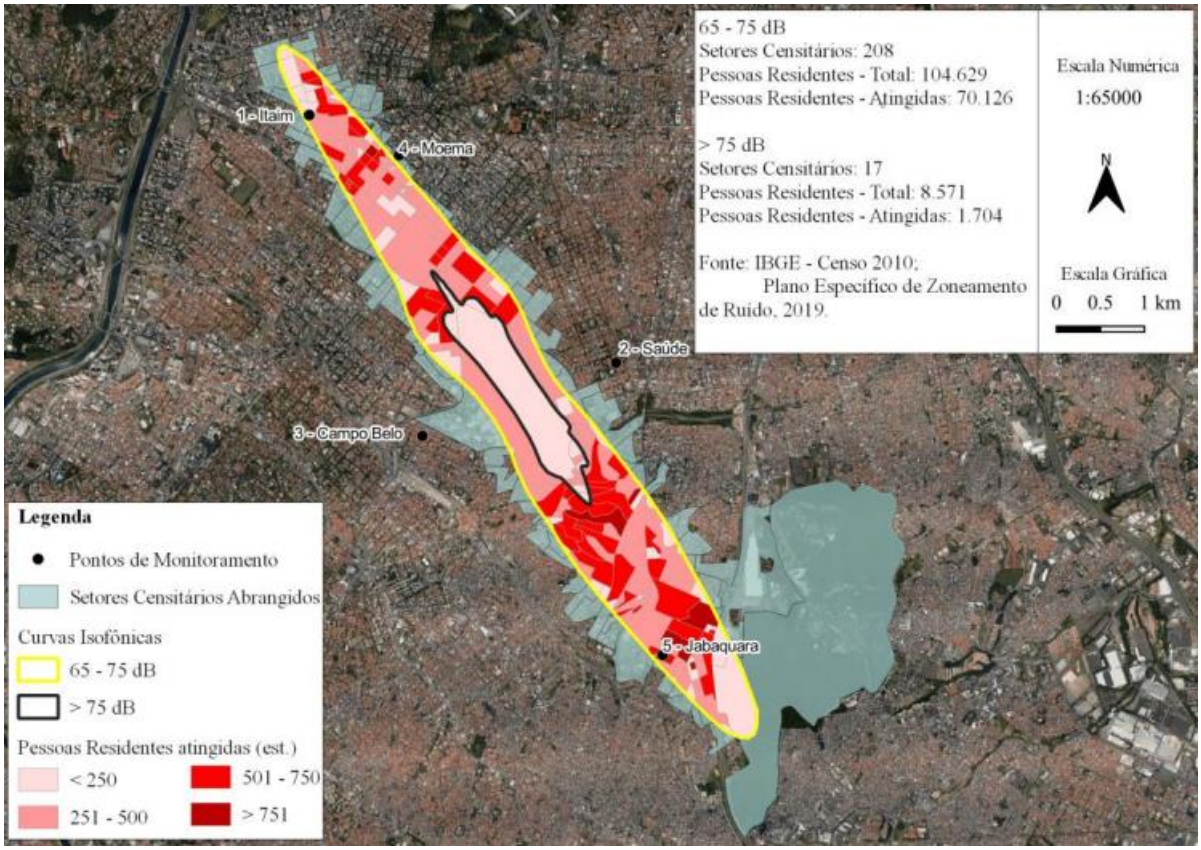


Figure 2 Overlay of 2010 Census Districts and São Paulo-Congonhas 2018 Noise Contours

Source: Prepared by the author, based on IBGE (2010) and INFRAERO (2019)

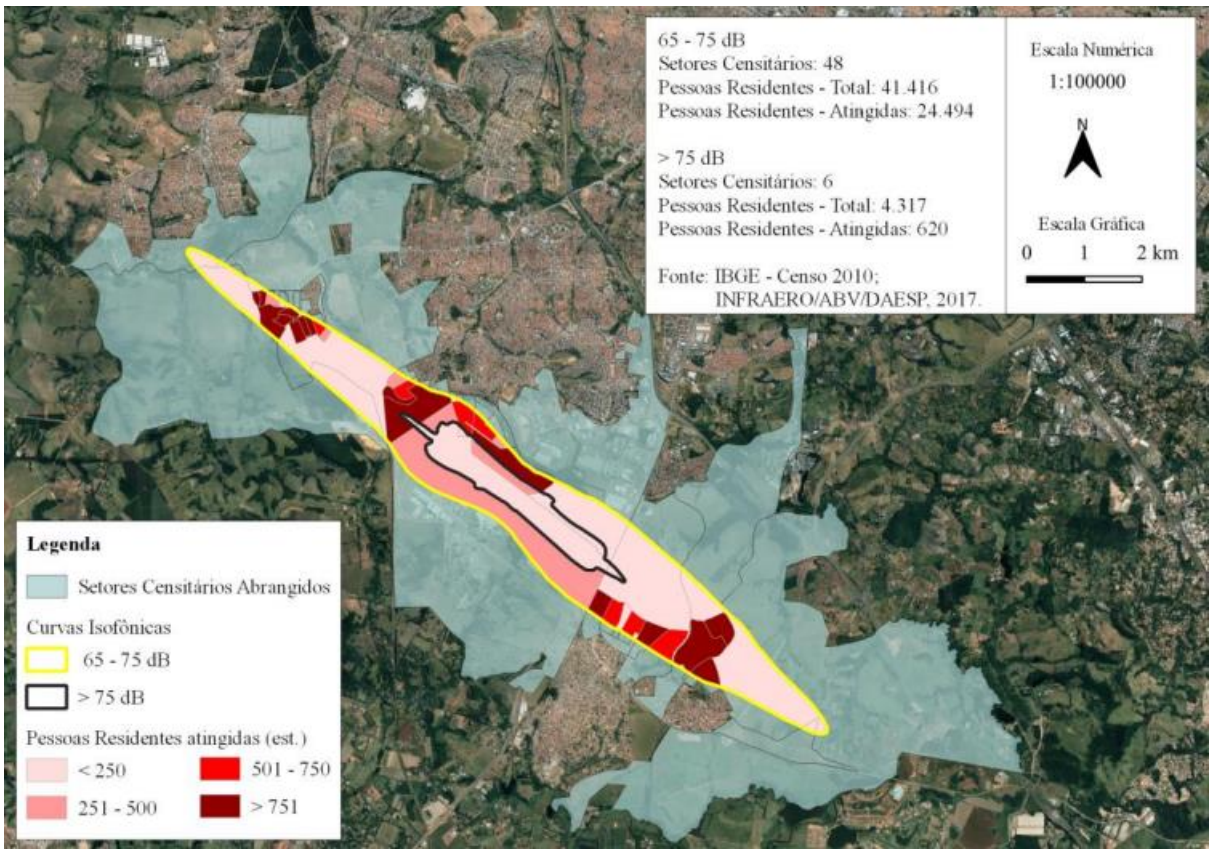


Figure 3 Overlay of 2010 Census Districts and Campinas-Viracopos 2017 Noise Contours

Source: Prepared by the author, based on IBGE (2010) and AEROPORTOS BRASIL, 2017)

Table 1 Area, Population, Dwellings, Schools and Health Units Within São Paulo-Guarulhos Airport 65dB and 75dB Noise Contours of 2019

Noise Contour	Heading	Area, Population and Housing Data x 2019 Noise Contours		
		Area (km^2)	Total Resident Population, 2010	Permanent Private Dwellings, 2010
65dB-75dB	West	21.56	108,076	33,086
	East	14.85	94,954	27,204
	Subtotal	36.41	203,030	60,291
>75dB	NW	6.75	7,663	2,160
	SW	0.35	3,653	1,099
	Subtotal	7.10	11,316	3,258
Total		43.51	214,346	63,549

Noise Contour	Heading	Types of Schools x 2019 Noise Contours				
		Private	Municipal	State	College	Total
65dB-75dB	West	23	13	16	0	52
	East	35	8	19	0	62
	Subtotal	58	21	35	0	114
>75dB	West	0	2	0	0	2
	East	2	0	0	0	2
	Subtotal	2	2	0	0	4
Total		60	23	35	0	118

Noise Contour	Heading	Types of Health Units x 2019 Noise Contours				
		UBS	UPA	Public Hospital	Private Hospital	Total
65dB-75dB	West	2	0	0	0	2
	East	7	0	0	0	7
	Subtotal	9	0	0	0	9
>75dB	West	0	0	0	0	0
	East	0	0	0	0	0
	Subtotal	0	0	0	0	0
Total		9	0	0	0	9

Table 2 Area, Population, Dwellings, Schools and Health Units Within São Paulo-Congonhas Airport's 55dB Noise Contours of 2011 and 65dB, and 75dB Noise Contours of 2018

Noise Contour	Heading	Area, Population and Housing Data x 2018 Noise Contours		
		Area (km^2)	Total Resident Population, 2010	Permanent Private Dwellings, 2010
55dB-65dB (2011)	NW	13.85	129,997	53,701
	SW	14.31	183,433	58,693
	Subtotal	28.16	313,430	112,394
65dB-75dB (2018)	NW	4.52	38,696	16,507
	SW	3.24	31,430	11,001
	Subtotal	7.76	70,126	27,508
>75dB (2018)	NW	1.02	753	264
	SW	0.10	951	309
	Subtotal	1.12	1,704	573
Total for 2018 only		8.88	71,830	28,081

Noise Contour	Heading	Types of Schools x 2011 Noise Contours				
		Private	Municipal	State	College	Total
55dB-65dB (2011)	NW	60	5	3	4	72
	SW	47	25	21	2	95
	Subtotal	107	30	24	6	167
65dB-75dB	NW	7	2	1	0	10
	SW	14	2	1	5	22
	Subtotal	21	4	2	5	32
Total		128	34	26	11	199

Noise Contour	Heading	Types of Health Units x 2011 Noise Contours				
		UBS	UPA	Public Hospital	Private Hospital	Total
55dB-65dB	NW	3	0	0	5	8
	SW	4	1	1	0	6
	Subtotal	7	1	1	5	14
65dB-75dB	NW	0	0	0	0	0
	SW	1	0	0	2	3
	Subtotal	1	0	0	2	3
Total		8	1	1	7	17

Table 3 Area, Population, Dwellings, Schools and Health Units Within Campinas-Viracopos Airport 65dB and 75dB Noise Contours of 2017

Noise Contour	Heading	Area, Population and Housing Data x 2017 Noise Contours		
		Area (km^2)	Total Resident Population, 2010	Permanent Private Dwellings, 2010
65dB-75dB	NW	3.56	13,842	3,675
	Along	5.72	3,436	965
	SW	5.07	7,216	2,040
	Subtotal	14.36	24,494	6,681
>75dB	NW	0.03	46	13
	Along	2.12	574	161
	SW	0.04	0	0
	Subtotal	2.19	620	174
Total		16.55	25,114	6,855

Noise Contour	Heading	Types of Schools x 2019 Noise Contours				
		Private	Municipal	State	College	Total
65dB-75dB	NW	0	2	2	0	4
	Along	0	1	0	0	1
	SW	0	3	1	0	4
	Total	0	6	3	0	9

Noise Contour	Heading	Types of Health Units x 2019 Noise Contours				
		UBS	UPA	Public Hospital	Private Hospital	Total
65dB-75dB	NW	0	0	0	0	0
	Along	0	0	0	0	0
	SW	1	0	0	0	1
	Total	1	0	0	0	1

Note: There are no schools nor health units within the 75dB contour of 2017 for Campinas-Viracopos Airport.

4. DISCUSSION

4.1 São Paulo-Congonhas (CGH/SBSP)

The number of people affected by São Paulo-Congonhas airport is extremely high when considering the original 2011, 55dB noise contour (313,431 people!) but this noise contour option was dropped from the regulations when they were incepted. Even considering the 2018 noise contours of 65dB and 75dB, the numbers of both resident people (71,830) and permanent dwellings (28,081) are still very high, indicating that this airport is severely impacting its neighbors.

The average of 2.56 people per impacted household is not a high-density indicator but considering the 8.88km^2 footprint of these more recent noise contours, the populational density of 8,089 inhabitants per square kilometer is extremely high – consistent with a wealthier population in its Northwest runway alignment versus lower income plus a large uninhabited State Park (São Paulo's Botanical Garden and Zoo) towards its runways' Southeast alignment.

The high number of schools (199 units of all kinds) and health units (17, including 7 hospitals) make clear the incompatibility of the neighborhood with the airport's activities. It is known that the airport got there first (São Paulo-Congonhas was originally built in 1936, at that time still far from the city center) but the city grew around it, encroaching its surroundings. This dense urbanization is also consistent with the fact that, despite having low-income neighbors especially in the runways' Southeast heading, as well as the wealthier Northwest communities, both communities are well-served by schools and health units, despite the proximity to the airport and laying within its incompatible 65dB and 75dB noise contours.

It is unlikely that this airport will ever be closed due to these impacts on its neighboring communities. On the other hand, it is predicted that aircraft fleet replacement with quieter post Chapter-3 aircraft by 2030 would show a reduction of these numbers, even if patronage is expected to increase to nearly 30 million passengers per year in larger and heavier aircraft (with re-arranged runway system and engineered runway-end safety areas). Skepticism indicates that this indication of smaller noise contours areas with so many more movements is unlikely to happen, but only time will tell.

On the other hand, pressure from civil society by these very neighbors have led, in the past, to the decision to curfew this airport from 11:00PM to 6:00AM in the following morning (the closure time is often violated, especially in Sunday nights: instead of grounding aircraft at 11:00PM sharp, aircraft of delayed flight are often allowed to take off in Sunday nights, for instance, preventing further disruption of the air transport network, given that São Paulo-Congonhas plays the role of a quasi-national hub airport).

Given the night curfew, on the other hand, the use of 24-hour daily average noise contour as sole indicator is of questionable value, as this procedure obviously neglects the peak noisier hours with more intense noise concentrated by early morning and late evening operations, which may affect more severely the airport's neighbors during such peak hours and single events.

4.2 São Paulo-Guarulhos (GRU/SBGR)

As this airport is a much larger, (national and international hub) operating continuously 24 hours per day, with more passengers and aircraft operations, it is naturally expected that its noise contours areas are larger. Indeed, the area of both noise contours of 2019 is 43.51km^2.

The number of resident people and permanent dwellings affected by its noise contours are surprisingly high – 214,346 people in 63,549 houses is equivalent to a mid-sized city, with a fairly large number of 3.37 people per household.

The populational density of 4,926 people per square kilometer is also very high, deriving both from low-income community concentrated in both West and East immediate runway alignments, and further boosted by the central area of Guarulhos municipality, where high-rise buildings were built over the past decades, reproducing the incompatible urban development trend that once happened around São Paulo-Congonhas airport in the past (Werneck de Oliveira, 2022b).

Although there are no projected 2030 noise contours for São Paulo-Guarulhos, a trend of worsening this community noise impact is likely to materialize. The current limit to this airport's runway capacity (2 parallel runways 275 meters apart) may change with the adoption of new procedures allowing simultaneous take off and landings. If this current restriction paradigm is changed, the number of aircraft movements may increase substantially, and so will the noise contours' areas and hence the number of people affected by aircraft noise, even considering day-night average contours.

4.3 Campinas-Viracopos (VCP/SBKP)

Campinas-Viracopos Airport, on the other hand, is the only of these airports in urban fringes, although there is a significant and growing encroachment of runway alignments and even along the runway. Thus, there are 25,114 people and 6,855 houses within the 16.55km^2 affected by 65dB-75dB and >75dB noise contours, but few if any schools or health units are present. This is not exactly because land use was properly planned; rather it is because a deficit of such urban equipment availability for these neighboring communities, as the low-income urban occupation of adjacent and runway-aligned areas seems to be more recently induced by Campinas' urban and Metropolitan dynamics – so there has been no sufficient time for such public services made available for these communities.

However, the ratio of 3.66 people per house is somewhat high for Brazilian standards, while the population density of 1,517inhabitants per km square is still substantial, indicating that this is a dense, low-income community living in small plots, consistent with the hypothesis of deficits in the availability of provision of schooling and health services in this urban fringes. No schools or health units were identified in 2020 within this airport's >75dB noise contour, hence the social deficit indicators of these communities.

5. CONCLUSIONS

The time gap between the population estimates from the 2010 population census versus the 2017, 2018 and 2019 noise contours based on previous year's aircrafts take-off and landings records leads to a possible underestimation of the number of people affected by aircraft noise in São Paulo-Guarulhos, Sao Paulo-Congonhas and Campinas-Viracopos airports.

Aircraft movements and passengers' patronage seem more volatile in growth recovery from the SARS-COV-2 Pandemics than actual population growth since 2010.

Brazilian airports noise contours are not based on continuous noise monitoring and are published at the site of the regulatory agency ANAC rather than at the airport's website, making it difficult for affected people to obtain such information or even to file noise complaints. Also, there are no regulations regarding maximum single-event noise levels enforced in Brazil. Furthermore, the so-called "noise planning zoning" are not plants at all; rather they are .pdf maps with encrypted noise contours, not even georeferenced. These facts make the use of noise contours insufficient to manage these airports' impacts on the communities they serve.

Data shown on this paper indicate that these three airports – mainly São Paulo-Guarulhos and São Paulo-Congonhas airports – severely impact a contingent of at least 286,176 people, with a higher figure when considering the 313,431 people enclosed within the São Paulo-Congonhas 55dB noise contour of 2011, when this airport was much less busy than it is now.

The numbers of São Paulo-Congonhas are further underestimated as this airport formally closes at 11:00PM and reopens only by 6:00AM every night, thus any 24-hour estimate becomes severely distorted as all its operations occur within a 17-hour daily window. This means that the actual number of people affected not by daily averages but by peak hours is most probably much higher.

The number of people affected by aircraft noise in the neighborhoods of these three airports ranges from a minimum of 300,000 people to a more probable half a

million, which is much higher than most large metropolitan areas served by major airport systems world-wide.

This thereby challenges the use of traditional 24-hours daily average noise contours without a rationale considering the night curfew of São Paulo-Congonhas and a single-event peak noise level regulation. Furthermore, the presence of schools and health units within the above 65dB noise contours areas are also indicative of land use incompatibility with airports' operations, calling for new, alternative means of dealing with the affected communities.

It is time for triggering a discussion regarding the adoption of noise abatement procedures on departure and approach paths, as well as noise insulation program of houses, schools and health units in the surrounding of these airports, especially São Paulo-Congonhas and São Paulo-Guarulhos, while there may still be room for better land-use planning and light industrial uses rather than residential development around Campinas-Viracopos airport.

6. REFERENCES

Aeroportos Brasil (2017). PEZR – *Plano Específico de Zoneamento de Ruído* – Aeroporto de Campinas – SBKP. Campinas: Aeroportos Brasil.

ANAC (National Civil Aviation Agency of Brazil) (2011). *Nota Técnica* (Technical Note) 02/2011/GT-Congonhas/ANAC. Brasilia: ANAC, 2011. [In Portuguese].

ANAC (National Civil Aviation Agency of Brazil (2019). Proposal of Amendment to the Brazilian Noise Zoning Plans of Aerodromes – PZR. Brasilia: ANAC, 2019. [In Portuguese].

Babish, W. (2005). Guest editorial – Noise and Health. *Environmental Health Perspectives*, 113(1): A14-A15.

Bronzaft, A. L. (2000). Noise: combating a ubiquitous and hazardous pollutant. *Noise & Health*, 2(6):1-8, 2000.

Cidell, J. (2008). Challenging contours: critical cartography, local knowledge, and the public. *Environment and Planning A*, 40(5):1202-1218.

DAEE (Department of Water and Energy of the State of São Paulo [Brazil]) (2013). *Water Resources Masterplan for São Paulo's Macro Metropolis*. São Paulo: DAEE, Water Resources Secretariat. [In Portuguese].

Evan, G. W., Bullinger, M. Hygge, S. (1998). Chronic exposure and psychological response: a prospective study of children under environmental stress. *Psychological Science*, 9(1):75-77.

Evans, G. W. and Maxwell, L. (1997). Chronic Noise Exposure and Reading Deficits: The Mediating Effects of Language Acquisition. *Environmental and Behavior*, 29(5):638-653.

GEOSAMPA. Metadata: Health Equipment in the City of São Paulo [In Portuguese]. Available at http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx. Viewed in June 2022.

GRU-Airport (2019). *PEZR of 15-09-2019, Revision A, sheets 1-3*. Available at: https:www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/planejamento-aeroportuário/PZRREGISTRADOS.pdf. Viewed in May 2022.

Hygge, S., Evans, G. W. and Bullinger. M. (2002). A prospective study of some effects of aircraft noise on cognitive performance of schoolchildren. Psychological Science, 13(5):469-474.

IBGE (Brazilian Institute of Geography and Statistics) (2010). Population Census, 2010. Available at: https://www2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm. Viewed at July, 2018.

INFRAERO (Brazilian Company of Airport Infrastructure) (2019). *Specific Noise Zoning Plan – PEZR – São Paulo Congonhas* (Deputado Freitas Nobre) – SBSP. Brasília: INFRAERO.

Jarup, L., Babisch, W., Houthuijs, D.., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Cadun, E., Dudley, M-L., Savigny, P., Seiffert, I., Swart, W., Breugelmans, O., Blhum, G., Selander, J., Haralabidis, A., Dimakopolou, K., Sourtzi, P., Velonakis, M., Vigna-Taglianti, F., (On Behalf of HYENA Study Team) (2008). Hypertension and Exposure to Noise

Near Airports: The HYENA Study. *Environmental Health Perspectives*, 116(3):329-333.

Roselund, M., Berglind, N., Pershagen, G. Järup, L. and Bluhm, G. (2001). Increased prevalence of hypertension in a population exposed to aircraft noise. *Occupational Environmental Medicine*, 58(12):769-773.

SEADE (Fundação Sociedade de Estatísticas e Análise de Dados). Data on Education and Health Equipment in the State of São Paulo – Metadata [In Portuguese]. Available at https://portalgeo.seade.gov.br/download-de-dados/. Viewed in July 2022.

Spreng, M. (2004). Noise Inducted Nocturnal Cortisol Secretion and Tolerable Overhead Flights. *Noise & Health*, 6(22):35-47.

Stansfeld, S. L., Haines, M. M., Burr, M., Berry, B., LERCHER, P. A. (2000). Review of Environmental Noise and Mental Health. *Noise & Health*, 2(8):1-8.

Werneck de Oliveira, L. H. (2022a). *The Conflict of Airports and Cities: The role of Urban and Regional Planning in Large world Metropolises – São Paulo and Los Angeles.* São Paulo: UFABC (Ph.D. Thesis. [In Portuguese].

Werneck de Oliveira, L. H. (2022b). Population Densities and Real Estate Development on the Alignment of São Paulo's Congonhas and Guarulhos Airports' Runways: The replication of a Conflictual Fate. In: Borelli, G. M. R., Gomes, R. A., Silva, E. J., Caetano, M., and Pereira, C. A. Eds. *Proceedings of SITRAER 2022 – Air Transportation Symposium*. São José dos Campos, October 2022, pp. 334-343, 2022.

.

TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS NO BRASIL: ACESSIBILIDADE E INTERMODALIDADE

Lucas Azeredo Rodrigues
Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geociências

*** Corresponding author e-mail address**: lucas.azeredo.rodrigues@gmail.com

PAPER ID: SIT2193

ABSTRACT

Air transport is essential for the movement of people around the world. In Brazil, due to its continental dimensions, it is essential to have a movement system that provides territorial fluidity. In many cases, getting to the airport is a significant problem, given that many cities, especially in the interior, have poor road transportation. In fact, few airports in the country have more than one modal option for access. It is in this sense that this study aims to analyze the preponderant role of intermodality in the connection with Brazilian airports. To this end, it uses the theoretical-methodological framework of the Geography of Circulation, Transport and Logistics, combined with qualitative and quantitative data obtained from public bodies, regulatory agencies and technical visits. In addition, this research makes use of a bibliographical review of the subject, graphs, tables and photos and maps as auxiliary ways of presenting the content. It is considered that there is a lack of dialog between State Logistics and Corporate Logistics. The results show that airports, especially those located in large metropolitan regions and granted to the private sector, have the most access options, as well as the most pressure on public authorities to establish new ways of getting around. Furthermore, regional airports, which account for the majority of Brazilian airports, have only individual transportation (private or cab) as a means of getting around.

Keywords: Aviation, Integration, Geography of Transport, Territorial Competitiveness, Tourism.

ACKNOWLEGDEMENTS

Esta pesquisa contou com financiamento do Projeto “Sistemas de Transporte e logística e seus papeis frente à competitividade territorial no Brasil nas duas primeiras décadas do século XXI”, com recursos oriundos da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT N°18/2021 – Universal.

INTRODUÇÃO

Em países de grandes dimensões territoriais, é fundamental possuir um sistema de transporte eficaz e fluido. Este, deve ser capaz de percorrer grandes distâncias em menor tempo. Neste interim contar com um setor aéreo estruturado é fundamental para o Brasil.

No entanto, as infraestruturas aeroportuárias do território nacional possuem um déficit no que se refere à acessibilidade. A maioria dos aeroportos do país estão comprometidos a terem apenas ligações rodoviárias, sendo que nos aeroportos regionais, muitas vezes o acesso se dá por transportes individuais. Isso se torna uma problemática significativa na fluidez territorial: os entraves de se deslocar até os aeroportos.

Os aeroportos que possuem outras opções para além do transporte individual conseguem ampliar sua competitividade. É imprescindível que o atributo de intermodalidade se torne uma peça fundamental na consolidação dos grandes *hubs*.

É neste sentido, que este trabalho objetiva analisar o atual panorama de acessibilidade de alguns aeroportos brasileiros localizados nas metrópoles e nas capitais regionais e centros-subrregionais. Os objetivos secundários consistem em: 1) identificar as formas de intermodais de acessibilidade em aeroportos do Brasil; 2) discutir a importância de ter uma estrutura de transporte coletivo eficaz e que se adeque ao *modus operandi* dos aeroportos; 3) resgatar exemplos, pontuais que podem ser adotados em outras cidades.

Para um país emergente como Brasil, é importante dispor de um conjunto de transportes eficazes, sobretudo nas grandes regiões metropolitanas, as quais sofrem constantemente com problemas de mobilidade urbana. Contribuir para o aprimoramento da integração entre diferentes modais coletivos com a infraestrutura aeroportuária é substancial.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Utiliza-se nessa pesquisa o referencial teórico-metodológico da Geografia da Circulação, Transporte e Logística, trabalhada por Silveira (2011). O autor aponta uma série de elementos que devem ser considerados a respeito dos sistemas de movimento do país. Para Silveira (2019), a circulação deve ser analisada como um "componente espacial" o qual é reflexo das interações espaciais da sociedade, assim como a logística, como componente fundante do planejamento e das estratégias. Silveira (2019) aponta que a concentração e centralização de investimentos em nós górdios da rede urbana brasileira favorecem a fluidez e competitividade territorial.

Sobre a temática do transporte aéreo, a contribuição de Barat (2012) segue no tocante de apontar possíveis gargalos e desafios da infraestrutura aeroportuária brasileira, e sua inserção no contexto globalizado. Já Rodrigues (2021) analisa o setor aéreo e a topologia dos seus fluxos, correlacionando a hierarquia dos aeroportos com a rede urbana.

Sob o viés da acessibilidade e mobilidade urbana, a pesquisas de Pons e Reynés (2003) nos indica a importância dos sistemas de transporte, sua integração, intermodalidade e importância par ao desenvolvimento urbano e regional. Cocco (2017), ainda

aponta possíveis soluçõespara amenizar os problemas crônicos sobre acessibilidade, transporte público e infraestrutura de transporte.

METODOLOGIA

Esta pesquisa conta com uma metodologia híbrida de dados quantitativos e qualitativos. A primeira, com a obtenção de dados oriundos de órgãos públicos, como a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) e das concessionárias aeroportuárias. A segunda, obtida da revisão bibliográfica, entrevistas e visitas técnicas em alguns aeroportos do Brasil. De forma auxiliar, adota-se o uso de mapas, gráficos, tabelas e quadros, para reforçar a discussão imposta na pesquisa. Ademais, é importante mencionar que o segmento aéreo selecionado é voltado para o transporte de passageiros em aeroportos com voos regulares.

DISCUSSÃO

A demanda pela redução do binômio espaço-tempo busca cada vez mais aperfeiçoar os sistemas de movimento. A adoção de novas técnicas, sejam elas operacionais, organizacionais ou incrementais, possibilitam um melhoramento da fluidez pelos modais. A aviação, por exemplo, demanda por constantes inovações, das quais são padronizadas em suas operações.

Poucos aeroportos no Brasil apresentam uma estrutura intermodal de acesso. Com o modal ferroviário (considerando VLT, trem, metrô e monotrilho), apenas Porto Alegre, Guarulhos (em expansão), Rio de Janeiro (SDU), Salvador, Recife e Fortaleza (em construção) apresentam ligação intermodal. Outros, apresentam o sistema de BRT, à exemplo, o Galeão (Rio de Janeiro) como forma alternativa. Cidades como São Paulo e Curitiba apresentam um sistema de transporte coletivo direto para aeroporto, passando por importantes pontos da cidade. Respectivamente, estamos tratando do Airport Bus Service e do Aeroporto Executivo.

A maioria dos aeroportos localizados nas principais cidades da rede urbana brasileira apresentam pelo menos uma linha de ônibus que se integre com o sistema da cidade, embora, em muitos casos seja precário. Para acessar aeroporto regionais com pequena oferta diária de voos, o usuário possui somente a opção do veículo individual (próprio, aplicativos ou táxi).

Cocco (2017), por exemplo, aponta que em Barcelona, a cidade apresenta o Aerobus (conexão expressa e direta entre o centro da cidade e o aeroporto) com veículos próprios para transporte de bagagem. Situação que poderia ser adaptada para a realidade brasileira.

Fomentar o processo de intermodalidade, sobretudo no que se refere ao transporte de passageiros, é cordial para que se possa pensar em outras demasiadas políticas de incentivo ao setor aéreo. O atributo de ter uma melhor acessibilidade à infraestrutura aeroportuária é adicionado à consolidação dos “neoterritorialismos”. Este conceito, trabalhado por Silveira (2020), é condicionado à lógica da competitividade e fluidez territorial, sobretudo no que se refere à adoção de estratégias logísticas do setor corporativo e do Estado.

Quanto maior forem as opções de acessar o aeroporto, maior será o leque de opções para atrair novos investimentos, sobretudo naqueles que

estão concedidos à iniciativa privada. Pois, é visível que a os agentes das concessionárias privadas olhem o transporte aéreo sob o viés comercial, diferente, por exemplo, da INFRAERO, que atua sob o viés social.

As rodadas das concessões aeroportuárias, iniciadas em 2012, atualmente contam com 93 dos 167 operantes (em ago/23). Os concedidos representaram 92,3% dos embarques domésticos e 100% do internacional (referente a jul/23). É importante mencionar o aumento do corporativismo nos aeroportos brasileiros, onde muitos já possuem um objetivo para além de simplesmente funcionar como um fixo que alimenta fluxos. Podemos encontrar críticas contundentes a esses sistemas nas obras de Teixeira (2018) e de Silveira e Quintilhano (2020). Nesses aeroportos, o diálogo com outras empresas é mais frequente, como o caso do Aeroporto de Florianópolis ao permitir embarque de linha regular em direção a Itapema e Balneário Camboriú.

Conforme as informações obtidas em entrevistas e trabalhos de campo, os aeroportos passaram também a ser agentes competitivos do transporte aéreo. Em muitos aeroportos do Brasil, o grande desafio continua sendo acessá-los, e em diversos casos, se observa o papel que isso tem na reconfiguração territorial dos fluxos aéreos.

É preciso pensar no planejamento territorial, e neles, a inserção de sistemas de transportes integrados e interligados. No caso do modal aéreo, ainda há a demanda pelo processo de retomada da popularização e ampliação das suas formas de acesso.

Dados do Relatório desenvolvido pelo Ministério da Infraestrutura "O Brasil que voa" (2013), aponta que 27,5% se deslocaram por meios de transporte individuais, 35,4% de táxi e transporte coletivo (metrô, trem, barco, transfer ou ônibus) somam 13,8%. Ainda de acordo com o relatório, 49,2% dos passageiros estão viajando a estudo ou trabalho, e 45,3% a lazer. Outra situação, apesar de ser quase minoria, a motivação de escolha pelo aeroporto devido à sua acessibilidade foram 1,7%. No entanto, vale destacar que a proximidade do destino final e ser única opção, contabilizam 38% cada.

É importante aqui fazer uma triagem. À grosso modo, temos dois segmentos de passageiros que possuem hábitos diferentes. De um lado, o passeio – que em muitos casos, opta por interações e meios mais baratos. De outro, o trabalho, sobretudo o setor corporativo, o qual demanda, por muitas vezes, de viagens de última hora, e por se tratar de outro nível de interação, e em sua maioria, possui despesas arcadas pelas empresas, não têm a busca incessante por preços baixos.

Não há dúvida de que o perfil recente do usuário de transporte aéreo no Brasil possui um médio/alto valor aquisitivo. O próprio custo de prestações de serviços nas hinterlândias, ou até mesmo no terminal de passageiros, é de um custo elevado, e isso se dá por diversos fatores que permeiam a lei da oferta e procura. A grande potencialidade de crescimento do setor aéreo no Brasil, sobretudo após a Pandemia de Sars-Cov-2, são as viagens à lazer. Pois, no cenário de isolamento social, as atividades corporativas foram substituídas pelas webconferências, das quais se tornaram uma mudança permanente do setor.

Os passageiros de negócios, possuem um período de viagem restrito,

com horários a serem cumpridos e uma agenda que demanda por maior presença de voos diretos. O que demanda por um tipo de serviço mais exclusivo. Já os passageiros de lazer, apesar de também terem pacotes de viagens, hotéis, e outras atividades atreladas ao turismo, geralmente possuem uma maior flexibilidade.

O Brasil, por sua vez, apresenta uma grande potencialidade turística, do Norte ao Sul. Desde atividades com atrativos naturais, históricos, culturais aos grandes eventos. Dados da ABEAR (2022) apontam que o valor adicionado do turismo em 2019 foi de R$ 249 bilhões (cerca de 2,9% do PIB) e que os impactos deste setor no modal aéreo chegaram a R$ 103 bilhões (1,4% do PIB). Takasago *at al* (2010) aponta que a cada R$ 1 milhão, são gerados 56 empregos diretos, indiretos e induzidos no transporte aéreo de passageiros, mais 95 empregos em atividades auxiliares ao setor aéreo. Os autores ainda destacam que o transporte aéreo constitui 8% das atividades turísticas no Brasil. É preciso pensar nas Atividades Características do Turismo – ACTs, das quais Coelho e Sakowski (p.8, 2014) apontam oito tipos: "alojamento; alimentação; transporte aéreo; transporte terrestre; transporte aquaviário; agências de viagem; aluguel de transporte; e cultura e lazer".

Cada vez mais fica evidente que é possível impulsionar o turismo de diferentes formas, sobretudo após a pandemia. Dos segmentos que podemos destacar, temos o melhoramento da acessibilidade aos aeroportos, como ferramenta de estímulo dos viajantes.

Em países desenvolvidos, sobretudo em cidades com vocações turísticas, existem várias formas de ligar diferentes áreas das cidades e região, aos aeroportos. É um cenário completamente diferente do Brasil, cuja intermodalidade fica restrita à poucas metrópoles. Cocco (2017) aponta em sua pesquisa as particularidades do Aerobús em Barcelona, que se trata de um ônibus de piso baixo, apropriado para transporte de malas, faixas exclusivas, dentre outras opções de acessibilidade.

Pouquíssimas cidades no Brasil, das quais se destacam as principais metrópoles, possuem um outro tipo de modal, alternativo ao rodoviário tradicional. Guarulhos/SP, Santos Dummont/RJ, Porto Alegre/RS, Salvador/BA e Recife/PE são as únicas que apresentam a ligação com o sistema ferroviário.

No caso do Rio de Janeiro, a recente discussão de transferência de voos do Santos Dummont para o Galeão perpassa pela questão da acessibilidade. O primeiro, voltado para atender o público da capital, e o Galeão, apesar da estrutura internacional, é mais próximo da baixada fluminense. No entanto, o dilema de ambos se torna seu acesso. O aeroporto central tem uma estação do VLT que interliga aos diferentes nós modais da cidade, como terminais urbanos, rodoviária, metrô, trem e barcas. Já o outro, possui o BRT, que após seu sucateamento, está passando por um processo de reestruturação.

Além da dificuldade de acessar os aeroportos, e o imbróglio acerca da limitação dos voos, faz sentido incentivar o estabelecimento dos voos internacionais, haja vista sua estrutura de *hub*. No entanto, é importante também fornecer ao usuário opções para deslocamento com qualidade e segurança. Inclusive, a Prefeitura da capital fluminense trabalha com estudos sobre a criação de linha aquaviária

interligando os aeroportos, mas a ação não resolve o problema de acesso.

A figura 1 nos ilustra de forma significativa a disparidade da prestação de serviços de transporte até os aeroportos no Brasil. É visível que para a maioria dos aeroportos com voos de passageiros regulares, a única forma de deslocamento é pelo transporte individual, seja ele particular, aplicativo ou táxi.

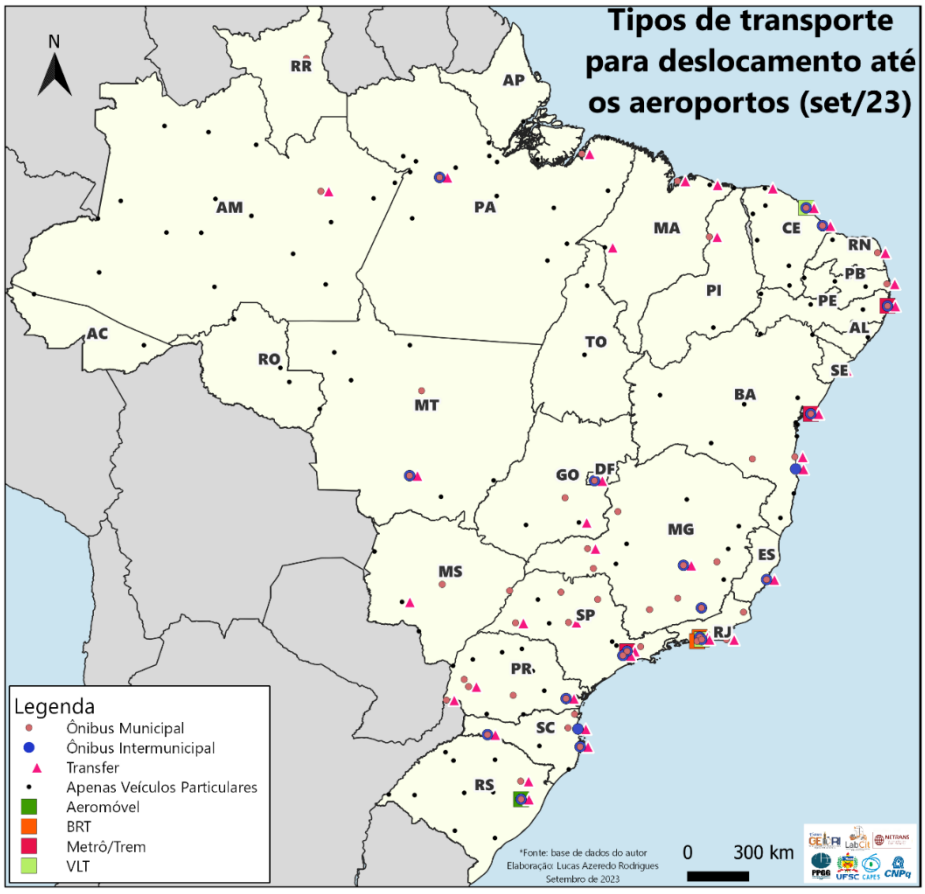


Figura 1- Mapa sobre formas de deslocamento até os aeroportos no Brasil.

Por outro lado, acessar aeroportos regionais também precisa ser incentivado, sobretudo aqueles mais distantes dos centros urbanos ou dos principais nós da rede urbana. Em Santa Catarina, por exemplo, o Aeroporto de Regional Sul – Jaguaruna, está entre 45km e 30km das duas principais cidades da região, Criciúma e Tubarão. O Aeroporto Regional Planalto Serrano, em Correia Pinto, está entre 25km e 30km de Lages, cidade mais importante do planalto catarinense.

A nova perspectiva de aeroportos que se localizam de forma estratégica para atender uma demanda regional, é de que estes devem ser pensados para o deslocamento dos usuários. Por exemplo, o caso do Aeroporto Zona da Mata, na cidade de Goianá/MG, que está a 46 km do centro de Juiz de Fora, no entanto, possui diversas linhas rodoviárias de ônibus para atender a demanda dos usuários.

Além do próprio passageiro, existem também os trabalhadores dos aeroportos que demandam pelo transporte coletivo. São inúmeros serviços demandados pela existência de um voo comercial, como apontam Lemos e Rodrigues (2021). Dados da ABEAR (2022) apontam que em 2019, eram 60 mil empregos diretos e 1,4

milhões indiretos. Trata-se de contingente bastante significativo para o país. Portanto, ter um transporte de acesso eficiente e popular, também favorece esse público.

A carência de serviços de ligação cidade-aeroporto é um fator inibidor. Em capitais Regionais do interior que possuem pouca oferta de voos, como Chapecó/SC, Passo Fundo/RS e Campos dos Goycatazes/RJ, é bastante comum os habitantes se deslocarem para aeroportos com mais ofertas, apesar da distância. Existem situações em que os passageiros fazem uma parte da viagem durante a noite, e pela manhã se dirigem para o aeroporto. É válido destacar que poucas regiões apresentam linhas rodoviárias que seguem ou possuem seção nos aeroportos.

Em Santa Catarina, por exemplo, O Aeroporto de Florianópolis conta com uma linha de ônibus rodoviário ligando direto à cidade de Balneário Camboriú, da mesma forma que o Aeroporto de São José dos Pinhais (figura 2), por estar próximo da BR-376 e BR-101, favorece a secção de algumas linhas, sobretudo em direção ao território catarinense. Mesmo que se tenha aeroportos relativamente próximos, em raios próximos de 100km, como Joinville/SC e Navegantes/SC.

Figura 2 Embarque de passageiros no transporte rodoviário interestadual no Aeroporto de São José dos Pinhais/PR. Fonte: Autor (2023)

Ainda que incipiente, e até de certa forma, improvisada, indica ao menos, uma possibilidade ao usuário. Caso este tivesse que fazer o deslocamento até a rodoferroviária de Curitiba, o passageiro deveria acrescentar aproximadamente 30 a 40 minutos, considerando o tempo de deslocamento somado ao intervalo do ônibus. Isto considerando a utilização do transfer executivo, pois, para utilizar o transporte público, levaria pelo menos 1 hora, desconsiderando eventos adversos como conexão entre terminais de integração e trânsito. A linha de ônibus semi-direta entre a rodoviária e o aeroporto, o “ligeirinho”, foi extinta em 2017.

Outros aeroportos no país apresentam mais opções de acessibilidade, como o caso do Santos Dummont no Rio de Janeiro. A presença do Veículo Leve sobre Trilhos – VLT (Figura 3), serve de integração com os diferentes modais da cidade, como as Barcas, Rodoviárias, Terminais Urbanos, Metrô e Trens.

Figura 3 Estação Santos Dummont do VLT Rio. Fonte: Autor (2023)

O caso de Confins/MG (figura 4), é um pouco mais complexo, sobretudo pela distância do aeroporto até o centro de Belo Horizonte, cujo trajeto leva aproximadamente 1 hora. Importante mencionar que as linhas diretas/executivas trafegam

parcialmente nas vias do BRT, o que aumenta a confiabilidade do tempo de viagem, mas, a limitação de acessar o aeroporto apenas pelo modal rodoviário, dificulta a circulação de mais passageiros. Pela importância que o BH Airport possui na hierarquia do transporte aéreo brasileiro, se constituindo como um *hub* emergente, é fundamental pensar em uma forma alternativa de deslocamento.

Figura 4 Ponto de embarque/desembarque de passageiros no Aeroporto de Confins/MG. Fonte: Autor (2023)

Guarulhos/SP, principal ponto de chegada de voos internacionais no país, possui uma linha de metrô (linha 13-jade), assim como Salvador/BA (linha 2). Ambas as situações contam com extensões terrestres do terminal de passageiros até a estação metroviária.

Figura 5 Estação de metrô do Aeroporto de Guarulhos. Fonte: Autor (2023)

É importante destacar as obras referentes ao AEROGRU, no aeroporto de Guarulhos (figura 6). Trata-se da construção de um APM aeromóvel (*Automated People* Mover) que conectará os terminais do aeroporto com a rede ferroviária metropolitana paulista. Além da segurança, trata-se de um serviço com maior segurança, conforto e agilidade.

Figura 6 Obras do AEROGRU. Fonte: Autor (2023)

Já o aeroporto de Porto Alegre, para integrar-se com a rede metroviária, possui o Aeromóvel (figura 7). Dados da TRENSURB (2023) apontam que o trajeto de quase 1km é realizado em 2 minutos e 30 segundos, por composições com capacidade de 150 e 300 passageiros.

Figura 7 Aeromóvel de Porto Alegre . Fonte: TRENSURB (2023)

Além dos exemplos anteriores, devemos mencionar o BRT, que contribui para um melhor acesso ao Galeão/RJ, e os metrôs de Recife/PE e Fortaleza/CE. O caso paulista, se inclui ainda o *Airport Bus Service* que interliga diferentes pontos da capital ao aeroporto de Congonhas, no entanto, com tarifas variáveis de R$35 à R$40. No entanto, é importante destacar a ausência de veículos e estrutura qualificada para tal. Situações, das quais, necessitam de acessibilidade.

Uma forma alternativa de deslocamento, mas que ainda é incipiente na maioria das cidades, é o transfer ou transporte executivo. Algumas localidades possuem rotas específicas, com roteiros pelos principais pontos hoteleiros e de transportes dos respectivos municípios.

Ao longo da pesquisa, ficou visível que acessar os aeroportos no Brasil é um problema. Aqueles que possuem uma infraestrutura mais robusta, apresentam um pouco mais de opções ao usuário, que, no caso de aeroportos regionais, é forçado é utilizar o transporte individual. O mapeamento indica que o interior brasileiro é o mais afetado, e que importantes capitais estaduais também possui sequelas oriundas da falta de planejamento territorial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apontam que acessar os aeroportos é um problema crônico no Brasil. A questão de mobilidade e do trânsito ressaltam importantes pontos como a pontualidade e confiabilidade do sistema de transporte público para o usuário do modal aéreo.

Apesar da vocação turística de muitas localidades brasileiras, o diferencial para aeroportos estrangeiros é que neles o usuário pode acessar com mais opções, segurança e confiabilidade.

Existe no Brasil uma ausência no fornecimento de alternativas para os usuários, até porque, o público executivo possui um maior poder aquisitivo, e geralmente, quem está em atividade de lazer, busca o melhor custo-benefício. Nas grandes cidades, é preciso repensar formas de acessar o aeroporto com maior fluidez. No caso dos aeroportos regionais, a utilização de transfers (vans) pode ser uma alternativa paliativa e que atenda a demanda espontânea.

Cabe destacar ainda o papel que o próprio trabalhador do aeroporto tem nessa demanda pela circulação no deslocamento casa-trabalho (aeroporto) que muitas vezes é ignorado.

Os dados publicados pelos meios oficiais do Governo Federal, como o "Brasil que voa" estão bastante atrasados, e precisam ser atualizados, como uma forma de obter um diagnóstico situacional dos aeroportos no país. Na escala municipal e estadual (confluindo com interesses regionais), cabe as autoridades o diálogo com a comunidade e empresas, com o intuito de estabelecer formas de deslocamento que fomentem o desenvolvimento urbano-regional, utilizando os aeroportos como um importante polo captador de circulação, seja de negócios ou de turismo.

É visível que nos aeroportos que estão concedidos às empresas estrangeiras, existe um diálogo mais presente com outras empresas e até mesmo com o Estado, em prol do estabelecimento de formas alternativas de deslocamento.

Por fim, é preciso melhorar a acessibilidade aos aeroportos brasileiros. Isso é bastante significativo para favorecer a criação de novas demandas regionais e geração de renda e emprego. Ao mesmo tempo, resgata a apetite territorial pela fluidez, a qual favorece e contribui para uma maior competitividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEAR – Agência Brasileira das Empresas de Transporte Aéreo. (2022).

Website oficial. Acesso em: 20 de agosto de 2023

ANAC – Agência Nacional da Aviação Civil. (2022). Website oficial. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

Barat, J. (2012). Globalização, logística e transporte aéreo. São Paulo: Editora Senac.

Brasil. (2013). Conheça o Brasil que voa: relatório executivo. PDF. Acessado em: 08 de setembro de 2023.

Cocco, R. G. (2017). Transporte público e mobilidade na Região Metropolitana de Florianópolis (1ª ed.). Florianópolis: Insular.

Coelho, M. H. P., & Sakowski, B. K. S. (2014). Perfil da mão de obra do turismo no Brasil nas atividades características do turismo e em ocupações. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).

Lemos, J. H. Z., & Rodrigues, L. A. (2021). Circulação, transportes e centralidade regional em Chapecó, Santa Catarina. Revista Da ANPEGE, 17(32), 22–48.

Seguí Pons, J. M., & Martínez Reynés, M. R. (2004). Geografía de los Transportes. Palma: UIB.

Silveira, M. R. (2019). Circulação, transporte e logística e seus impactos na fluidez e na competitividade territorial no Brasil. In: M. R. Silveira & N. F. Felipe Júnior (Orgs.), Circulação, transporte e logística no Brasil (pp. 17-65). Florianópolis: Insular.

Silveira, M. R. (2020). A competitividade territorial: alguns elementos para discussão. Entre-Lugar, 11(21), 45–74.

Silveira, M. R. (2011). Geografia da Circulação, Transportes e Logística: construção epistemológica e perspectivas. In: M. R. Silveira (Org.), Circulação, Transportes e Logística: diferentes perspectivas (pp. 21-67). São Paulo: Outras Expressões.

Silveira, M. R., & Quintilhano, D. (2019). Os efeitos das concessões aeroportuárias no Brasil entre os anos de 2012 a 2018. Geosul, 34(70), 87-112.

Takasago, M., Guilhoto, J. J., Mollo, M. L. R., & Andrade, J. P. (2010). O Potencial Criador de Emprego e Renda do Turismo no Brasil. Pesquisa e Planejamento Econômico (Rio de Janeiro), 40, 431.

Teixeira, S. H. O. (2018). Planejamento, informação e circulação: as concessões dos aeroportos brasileiros e os usos corporativos do território (Tese de doutorado).

TRENSURB. (2023). Website oficial. Acessado em: 08 de setembro de 2023.

AIRLINES REGULATION AND MANAGEMENT

Airlines Regulation and Management is a technical area that discusses Public Policies and Regulation of airlines, Human Resources, Competition and other characteristics related to airline companies. In that technical section, most of the authors are from government agencies and public universities, especially from the southeast region of Brazil.

This page intentionally left blank.

ROTAS AÉREAS REGIONAIS SUBSIDIADAS PARA CONECTIVIDADE DE LOCALIDADES ISOLADAS NA AMAZÔNIA

Celso José Leão e Silva*, Maurício Oliveira de Andrade, Viviane Adriano Falcão, Carlos Fabrício Assunção da Silva
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco

***Corresponding author e-mail address:** celso.leao@anac.gov.br

PAPER ID: SIT2219

ABSTRACT

Vários países estabeleceram estratégias específicas de subsídios visando à integração de suas regiões por meio do transporte aéreo por ser o único meio de transporte viável, face à indisponibilidade de acesso por outros modos de transporte. A Amazônia se insere nesse cenário e tem singular importância para o mundo. Com o argumento de que linhas aéreas para atendimento a localidades isoladas não despertam o interesse do mercado, sustentou-se a seguinte hipótese de que as localidades isoladas da Amazônia, em situações análogas a diversas localidades no mundo onde os serviços de transporte aéreo são subsidiados pelos governos, apresentam-se em diferentes níveis de dependência do transporte aéreo para serem acessadas e esta classificação pode ser estabelecida por meio de um valor numérico obtido pela aplicação de uma função de classificação de linhas aéreas subsidiadas. Um total de 1.365 rotas em 28 países das Américas, Ásia, Europa e Oceania que adotam a prática de subsídio ao transporte aéreo por razões diversas foram analisadas e embasaram a formulação de uma função (U), resultou em valores que representam dependência do transporte aéreo, legitimando a continuidade da existência de subsídio para serviços como requisito fundamental para acesso da população em suas necessidades de deslocamento. Foi aplicada a função numérica para duzentos e oito supostos pares de rotas na Amazônia, com origem em localidades situadas em áreas remotas, mas que que possuem infraestrutura de aeródromos instalada e homologada a serviços públicos de transporte aéreo de passageiros. Os resultados ilustram por meio de valores as rota que justificam a percepção de subsídios para sua viabilização.

Keywords: transporte aéreo; aviação regional; subsídio; áreas remotas

1. INTRODUÇÃO

Um grande marco para o desenvolvimento do transporte aéreo, com o surgimento de novas empresas e aumento da competitividade, pode ser entendido como a desregulamentação do setor ocorrido nos Estados Unidos em 1978 (SMITH et al, 2012; BRÅTHEN, 2011; GRUBESIC e WEI, 2012; METRASS-MENDES, NEUFVILLE e COSTA, 2011). Porém, para as pequenas localidades situadas em regiões remotas, isoladas ou mais pobres, as forças de mercado afastaram empresas de grande ou médio porte, visto que as rotas se tornaram menos atraentes e se configuraram em perdas financeiras de operação, o que as tornara comercialmente inviáveis. Para absorver essas ligações aéreas, governos de diversos países criaram políticas e programas variados para a viabilização de uma rede complementar de transporte aéreo regional, com base em critérios de regulação e subsídio estatal, consoante as características geográficas, políticas e sociais das localidades a serem atendidas (LEÃO E SILVA et al., 2021).

Quando observadas localidades isoladas da região amazônica pertencentes a outros países da América do Sul, observa-se que programas de subsídios a voos regulares implementados pelos governos dos países têm conseguido atender uma parcela significativa da população e localidades isoladas da selva. Por outro lado, no Brasil, onde se encontram localidades mais populosas e igualmente isoladas, o atendimento percentual por voos subsidiados é extremamente baixo, senão nulo, se não considerados os subsídios parciais oferecidos pelo Governo do Pará em forma de descontos de impostos sobre a gasolina de aviação (AVGAS). A Tabela 1 ilustra o número identificado de localidades isoladas na Amazônia que dispõem de aeródromos regulares, sua população e o percentual atendido pelas linhas subsidiadas.

No Brasil, e especialmente nas localidades isoladas da Amazônia, essa provisão de transporte aéreo subsidiado foi incipiente, deixando tais localidades sem um acesso rápido e/ou eficiente.

O objetivo deste artigo foi identificar localidades remotas na região da Amazônia, que justificassem a aplicação de subsídios públicos para a implementação de rotas aéreas como serviço público essencial para o bem-estar e segurança das populações isoladas.

Tabela 1 – Localidades e populações isoladas da Amazônia – Linhas subsidiadas

País	Número de localidades isoladas com aeroportos	Percentual de localidades atendidas	População total das localidades isoladas	Percentual de população atendida
Equador	73	32,9	13.487	53,3
Colômbia	15	53,3	218.027	52,5
Peru	17	64,7	181.533	42,4
França (Guiana)	5	60,0	23.431	91,6
Brasil	38	5,3	1.088.703	12,6

Fonte: Os Autores (2021). Dados obtidos dos órgãos oficiais de estatística dos países

Para tanto, o assunto foi pesquisado nas publicações acadêmicas e nos dispositivos normativos e regulatórios publicados, na revisão bibliográfica sobre a evolução de programas de subsídios ao transporte aéreo para identificar linhas aéreas que possam ser subsidiadas para atuarem como mecanismo de conectividade de regiões remotas e isoladas. Com isso, foi possível justificar o alto grau de dependência da rota como linha de vida de acesso a serviços essenciais, através da proposição de uma função que permita identificar localidades remotas da Amazônia para atendimento por linha de vida subsidiada.

Em 2019, A Amazônia brasileira possuía 65 municípios sem acesso rodoviário – ou em estado de precariedade - e sem o atendimento de linha regular de transporte aéreo. De acordo com o cadastro nacional de aeródromos públicos (ANAC, 2020b), assim determinadas as infraestruturas aeroportuárias autorizadas a operar serviço público de transporte aéreo, há 35 aeródromos instalados na região amazônica que não estão inseridos na malha aérea de voos regulares. Essas localidades apresentam população entre 2,5 mil e 72 mil habitantes e não são acessíveis por via rodoviária.

Embora investimentos públicos de melhoramento das infraestruturas aeroportuárias brasileiras tenham atingido a cifra de mais de 100 milhões de reais entre 2010 e 2016 (SAC, 2016), ainda há localidades isoladas na região amazônica, que permanecem carentes de um modo de transporte regular e rápido para sua conectividade com outras cidades.

Os registros disponibilizados no Portal da Transparência do Governo Federal (disponível

em www.portaldatransparencia.gov.br, acessado em 10/11/2019) revelam os investimentos na infraestrutura por meio de convênios celebrados entre 2011 e 2016, com desembolsos registrados entre 2015 e 2019. Alguns investimentos estão indicados na Tabela 2.

Como resultado, foram identificadas 208 localidades na Amazônia para onde o acesso rodoviário ou hidroviário é precário ou inexistente, porém abrigam instalações de infraestrutura aeroportuária capazes de receber voos regulares. A função de utilidade foi aplicada a essas localidades, com base em diversas variáveis socioeconômicas e geográficas, a fim de apresentar uma classificação hierárquica sobre possíveis rotas aéreas que pudessem ser viabilizadas através de subsídios, como meio de promoção de acessibilidade dessas localidades, sem a vinculação direta à verificação de suas condições de desenvolvimento econômico.

Tabela 2 – Investimentos em aeroportos brasileiros

Aeroporto	Valor celebrado (R$)	Valor investido (R$)	Operadores aéreos	Passageiros embarcados
Serra Talhada – PE nota 1	33.340.385,91	15.340.385,91	0	0
Governador Valadares-MG	32.000.000,00	544.279,84	2	25.504
Bom Jesus - PI	21.591.273,06	234.311,00	0	0
Santo Ângelo - RS	3.595.086,78	3.595.086,78	0	0
Aracati-CE	2.137.860,00	2.000.000,00	1	1.952
Cajazeiras - PB	1.510.661,23	1.510.661,23	0	0
Correia Pinto - SC	1.312.599,72	1.312.599,72	0	0

Fontes: (ANAC, 2019). Dados obtidos no Portal da Transparência – Governo Federal e Anuário Estatístico do Transporte Aéreo. Nota 1: aeroporto de Serra Talhada iniciou operações regulares para Recife e Caruaru em 2020

2. METODOLOGIA

Foram coletadas informações socioeconômicas de 1.365 rotas subsidiadas em 28 países das Américas, Ásia, Europa e Oceania, total que representa as informações disponibilizadas pelos países que adotam a prática de subsídio ao transporte aéreo por razões diversas. Foi utilizado um modelo estatístico de regressão logística em que os perfis das comunidades atendidas foram divididos em oito clusters, sobre os quais foram aplicados testes de hipóteses, com o que se identificou a não normalidade das distribuições de frequência de todas as variáveis, tanto o conjunto de linhas subsidiadas de natureza econômica quanto aquelas consideradas como linhas de vida, caracterizadas como elo essencial para comunidades remotas. Os dados foram processados com uma modelagem de função de linha subsidiada, que indica uma priorização de rotas aéreas a serem subsidiadas.

A amostra de voos subsidiados foi quantificada em 1.365 rotas distribuídas em todos os continentes, à exceção da África, abrangendo praticamente todas as latitudes (54,93111°S a 76,42583°N) e longitudes (176,64248°W a 177,73833°E) habitadas do planeta.

No segundo passo buscou-se reunir informações referentes aos dados divulgados pelos programas: recursos investidos, passageiros transportados e movimento de aeronaves. Essa etapa visou estruturar uma análise exploratória de dados de suporte às análises. Porém, em sua completude esses dados são escassos para a grande maioria das rotas. Por essa razão, foram considerados nos modelos e análise apenas os dados de população e PIB per capita das cidades de origem, distância percorrida na rota e sua condição de acesso por terra.

Os dados foram pesquisados nos sítios eletrônicos oficiais dos órgãos nacionais de Transporte e Aviação que contemplam programas de subsídios consolidados há décadas e comumente citados em artigos científicos sobre o tema, como os programas europeu (PSO) e

norte-americano (EAS), bem como de outros países já amplamente discutidos na literatura acadêmica (Canadá e Austrália). Uma relação detalhada dessas fontes de pesquisa está contida no Apêndice A, com acessos realizados no período compreendido entre setembro de 2020 a setembro de 2021.

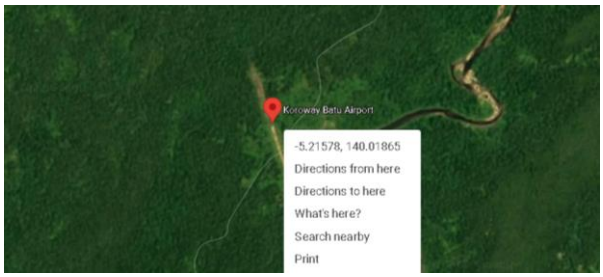
A próxima etapa foi observar outros países do mundo que mantivessem programas semelhantes ou alguma forma de subvenção ao transporte regional, assumindo-o como ferramenta de integração nacional, de desenvolvimento econômico de regiões específicas ou por razões de defesa do território, dentre outras. Assim, o primeiro aspecto observado teve relação com as dimensões geográficas dos países, numa busca por programas ou políticas efetivamente implementadas por aqueles com maiores áreas territoriais. Foram identificadas então iniciativas em oito dos dez maiores países do mundo em extensão territorial: Rússia, China, Brasil, Índia e Cazaquistão, além de Canadá, Estados Unidos e Austrália.

O banco de dados passou a ser estruturado em planilha, por rota aérea subsidiada, e dados das condições socioeconômicas e geográficas foram inseridos para cada uma delas. Informações sobre população de cada localidade atendida e PIB foram consultadas nos sítios oficiais de estatística dos países e do bloco europeu ou mesmo de administrações locais das comunidades, por vezes, muito pequenas, que acabam por não ser identificadas separadamente em sítios estatísticos oficiais de nível federal. Da mesma forma, o valor para o PIB per capita associado a cada localidade de origem está baseado em informações publicadas em nível municipal, quando disponível, como é o caso das cidades brasileiras em que o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) tem o levantamento individualizado por município divulgado em seu sítio eletrônico (www.ibge.gov.br), ou em nível provincial ou estadual, como das localidades do Equador ou Rússia, por exemplo, cujo PIB per capita está indicado como o da respectiva província ou estado onde estão situadas.

As coordenadas geográficas dos aeródromos que atendiam as localidades de origem foram consultadas em cartas aeronáuticas específicas ou em sítios eletrônicos utilizados por aeronautas, como www.gcmap.com. Algumas poucas localidades com poucos habitantes e cujos aeródromos não estavam cadastrados nas fontes supracitadas foram identificadas através do Google Maps (www.maps.google.com) e dessa consulta foram estimadas as coordenadas geográficas de suas pistas de pouso. Um exemplo prático foi a estimação das coordenadas geográficas da pista de pouso da localidade Koroway Batu, na Indonésia, ilustrado na Figura 1.

Outro dado relevante que foi coletado referiu-se à etapa da rota subsidiada em quilômetros, correspondente ao deslocamento da cidade de origem à cidade de destino. A distância em milhas náuticas pode ser consultada através do sítio eletrônico www.skyvector.com e transformada em seguida para a unidade quilométrica. O mesmo endereço eletrônico foi utilizado para cálculos de distâncias alternativas,

Figura 1 – Coleta de dados de coordenadas – exemplo de Koroway Batu, Indonésia



Fonte: Google Maps

Foram utilizados os atributos, tais como distância do voo (dist), distância do aeroporto com voo regular mais próximo (alter_dist), população da cidade de origem do voo (pop), PIB percapita da cidade de origem (gdp_per), além das variáveis relativa aos aspectos geográficos, como o fato de ser uma cidade situada em uma ilha, em localidade com clima severo (neve), localidades nas florestas, e, por fim, foi considerada a latitude positiva.

Cabe destacar que a variável PIB per capita é uma variável proxy de renda, isto é, apresenta-se em substituição da variável real de interesse – renda ou poder de compra da população, que não estava disponível para todas as localidades consideradas na amostra.

Com o objetivo de identificar os atributos que influenciam o aumento da utilidade das

linhas de vida, a metodologia adotada tem como base os estudos da literatura relacionados ao modo aéreo (NEGRI, BORILLE e FALCÃO, 2019) e livros que tratam de modelos de escolha discreta (HENSHER, ROSE e GREENE, 2005; TRAIN, 2009; BEN-AKIVA e LERMAN, 1985). Até o momento, não foram encontradas referências de aplicação dessa metodologia para classificar rotas subsidiadas como linhas de vida.

A forma adotada para a função de linha subsidiada está ilustrada na Equação:

$Ulv = \beta 0 + \beta 1 \cdot ilha + \beta 2 \cdot$ neve + $\beta 3 \cdot$ floresta + $\beta 4 \cdot$ conec + $\beta 5 \cdot dist + \beta 6 \cdot pop + \beta 7 \cdot pib + \beta 8 \cdot distalt + \beta 9 \cdot latpos + \varepsilon$

em que:

U_{lv}: função utilidade de linha de vida;

ilha: cidades atendidas localizadas em ilhas;

neve: cidades atendidas que tem invernos rigorosos;

floresta: cidades atendidas localizadas em florestas;

conec: conectividade terrestre das cidades de origem;

dist: distância entre a origem e o destino;

pop: população atendida na cidade de origem;

pib: produto interno bruto per capita da cidade de origem;

distalt: distância do aeroporto mais próximo da cidade de origem com voo regular;

latpos: módulo da latitude da cidade de origem, em graus;

ε : termo aleatório;

β_0: constante

β_1 a β_9: coeficientes dos atributos.

A multicolinearidade gera um problema nos modelos de regressão quando os regressores estiverem correlacionados. Contudo, há alguns testes que podem ser feitos de forma a verificar a multicolinearidade entre as variáveis, que podem interferir no melhor modelo. Um teste muito comum, sugerido por Fávero et al. (2019) é o teste VIF (Variance Inflation Factor), traduzido para Fator de Inflação da Variância. Quando o VIF é igual a 1, há a ausência de multicolinearidade, e, quando maior do que 10, indica problemas de multicolinearidade, que podem interferir no modelo.

3. RESULTADOS

Alguns governos definem as regiões dos respectivos países em que as linhas devem ser subsidiadas, diante da condição de isolamento em que se encontram.

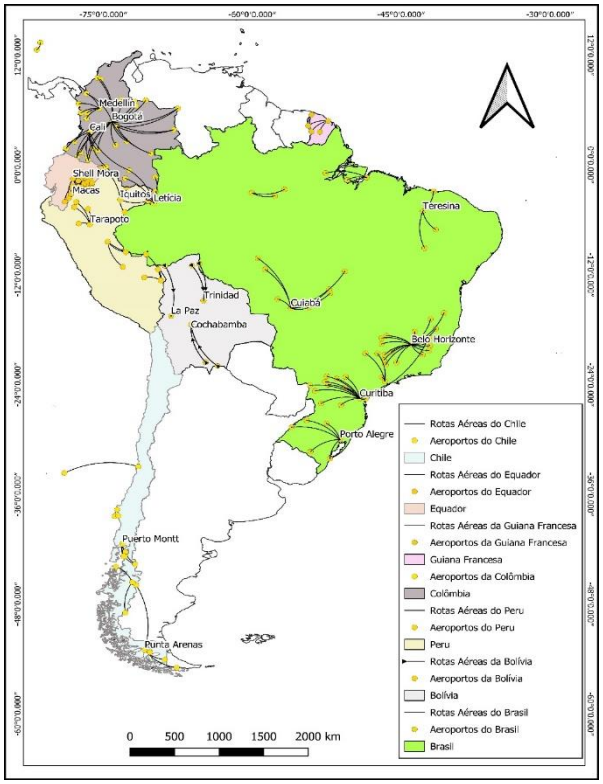
Com diversas comunidades inseridas no interior da floresta amazônica, a América do Sul é um cenário desafiante para a acessibilidade por meio aéreo. Países como Equador, Colômbia, Peru e França, a quem pertence o território ultra marinho da Guiana Francesa, dispõem de programas focados na viabilização do transporte aéreo, de e para essas comunidades isoladas, não acessíveis por rodovias e sem transporte aquaviário eficiente e regular. Na região amazônica do Brasil que apresenta situações semelhantes, apesar da vasta rede hidroviária navegável, não há um programa de subsídio governamental com essa finalidade e alcance

Na América do Sul, três países se destacam:

- Colômbia – a Política de Servicios Aéreos Esenciales (Lei 1753/2015): subsídios a passageiros através da empresa aérea governamental SATENA – Servicio Aéreo a Territorios Nacionales tem por finalidade integrar as regiões mais distantes do país com centros econômicos, com apoio ao desenvolvimento social, cultural e econômico e exercer a soberania nacional em zonas fronteiriças. São rotas em regiões de difícil acesso e conectividade, que, sob condições de mercado não seriam atendidas, mas que poderiam no futuro deixar de serem rotas sociais. Concentram-se na região amazônica do sul e sudeste do país e na costa do pacífico;
- Peru – o Programa Vuelos Subsidiados tem por finalidade integrar o território nacional, com melhoria de qualidade de vida e evitar movimentos de emigração e despovoação do território, principalmente em localidades em zonas fronteiriças com Brasil e Colômbia, na Amazônia; e
- Equador - *Plan Integral de la Circunscripción Territorial Especial Amazónica* -ECORAE – *Ecodesarrollo Regional Amazónico*. O objetivo é atender famílias mais pobres com serviço social de transporte de pacientes e equipamentos básicos de saúde, localizadas em

São as comunidades isoladas do interior da selva amazônica que compõem o mais vasto cenário geográfico na América do Sul de atendimento por rotas aéreas subsidiadas por quase todos os países com populações localizadas nessas regiões, como se observa na Figura 2.

Figura 2 - Rotas subsidiadas na América do Sul



Fonte: Os Autores (2022)

Após a aplicação da função de utilidade nas 1.365 linhas subsidiadas da amostra, observa-se que os valores variaram de -13,0557 (Macon-GA a Baltimore-MD, Estados Unidos) a 5,8780 (Mangoli a Ternate, Indonésia), resultados que sugerem uma classificação de baixa a alta aderência ao conceito de linhas de vida. Pode ser entendido que os valores mais altos da função estão mais associados com linhas aéreas identificadas como mais úteis, para as quais o suporte público de viabilização através de subsídios melhor se justifica, enquanto os valores mais baixos são identificação em ligações aéreas por motivo de desenvolvimento econômico ou, por conectividade com redução do tempo de viagem, quando comparados com outros meios de acesso substitutos, porém mais demorados.

Comparados os resultados da função de utilidade, observa-se que os valores mais altos da função, mais úteis em se tratando como linhas das linhas subsidiadas que atendem comunidades pobres isoladas nas florestas tropicais sem acesso terrestre, na região da Bacia Amazônica e das florestas tropicais da Indonésia e Malásia.

4. CONCLUSÃO

O modelo elaborado permitiu interpretar as semelhanças e diferenças entre serviços, locais e isolamento e concluir os propósitos primários dos programas revelados pelos dados, permitindo uma análise descritiva, geográfica e causal dos serviços aéreos subsidiados. Assim, a maioria dos serviços humanitários e essenciais pode ser distinguida de situações em que as motivações estão principalmente ligadas a aspectos econômicos, como a expansão da rede regional e a integração com a rede aérea nacional. A função de classificação de linha subsidiada foi aplicada a localidades isoladas da região amazônica, com o objetivo de identificar aquelas que se apresentam numericamente mais justifiáveis para a aplicação de subsídios, como parâmetro de priorização de escolha. Constatou-se que algumas localidades com valores mais altos correspondem exatamente àquelas que já se encontram contempladas nas políticas públicas nacionais de subsídio ao transporte aéreo. As três localidades com rotas aéreas já subsidiadas na Guiana Francesa estão dentre as quatro com maiore valores; no Peru e também na Colômbia, foram seis localidades dentre as dez com maior valor; no Equador, cinco dentre as dez. No Brasil, as duas localidades remotas com rotas que recebem algum tipo de subsídio estatal para operação na região amazônica estão dentre as dez com maior valor, incluindo a de valor mais alto, Almeirim, no Pará. A Figura 1 ilustra a localização e faixa de valores obtidos com a aplicação da função para as 208 localidades consideradas na Amazônia.

A função de utilidade deve ser entendida então como um modelo estatístico com a finalidade de correlacionar fatores e características das localidades com o atributo de contemplação de subsídios públicos para operacionalização de rotas aéreas com características de linha de vida, com caráter essencial para a conectividade com regiões mais desenvolvidas e inseridas na malha aérea.

A função de utilidade foi testada em rotas definidas com origem nessas localidades e destino ao aeroporto mais próximo atendido por voo regular e os resultados obtidos estão indicados na Tabela 3, por valor decrescente.

Tabela 3 – Ranking de rotas na Amazônia para subsídio – Função de Utilidade

País	Origem	Destino	Valor de U_{iv}– (Função de Utilidade)
Brasil	Fonte Boa	Tefé	3,918
Brasil	Muaná	Belém	3,918
Brasil	Ponta de Pedras	Belém	3,908
Brasil	Manicoré	Manaus	3,902
Brasil	Porto de Moz	Almerim	3,893
Brasil	Alenquer	Santarém	3,889
Brasil	Urucará	Parintins	3,889
Brasil	Terra Santa	Parintins	3,887
Brasil	Faro	Parintins	3,879
Brasil	Juruá	Tefé	3,862
Brasil	Borba	Manaus	3,859
Brasil	São Paulo de Olivença	Tabatinga	3,857
Brasil	Barreirinha	Parintins	3,844
Brasil	Nova Olinda do Norte	Manaus	3,836
Brasil	Tapauá	Lábrea	3,812
Brasil	Itamarati	Eirunepé	3,743
Brasil	Atalaia do Norte	Tabatinga	3,735
Brasil	Pauini	Lábrea	3,715
Brasil	Canutama	Lábrea	3,698
Brasil	Santa Rosa do Purus	Rio Branco	3,660
Brasil	Envira	Eirunepé	3,655
Brasil	Jordão	Cruzeiro do Sul	3,622
Brasil	Marechal Thaumaturgo	Cruzeiro do Sul	3,613
Brasil	Porto Walter	Cruzeiro do Sul	3,610
Brasil	Oiapoque	Macapá	2,942
Brasil	Oriximiná	Santarém	2,883
Brasil	Cachoeira do Arari	Belém	2,881
Brasil	Óbidos	Santarém	2,858
Brasil	Prainha	Santarém	2,850
Brasil	Monte Alegre	Santarém	2,842

5. REFERÊNCIAS

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Lista de Aeródromos Públicos. Disponível em https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/aerodromos/lista-de-aerodromos-publicos. ANAC (b). Acesso em 22 de junho de 2020

BEN-AKIVA, M.E.; LERMAN, S.R. Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand, vol. 9 MIT press, 1985

BRÅTHEN, S. Transport for Society: Air Transport Services in Remote Regions. Invited paper written for the International Transport Forum, OECD, Leipzig, 2011

FÁVERO, L.P.; BELFIORI, P.; DA SILVA, F.B.; CHAN, B.L. Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: Elsevier– 5ª reimpressão. Il., 2009

GRUBESIC, T.H.; WEI, F. Evaluating the efficiency of the Essencial Air Serviice program in the United States. Transportation Research Part A 46, pags.1562- 1573, 2012 http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2012.08.004

HENSHER, D.A., ROSE, J.M., GREENE, W.H. Applied Choice Analysis – A Primer.Cambridge University Press, New York, 2005.

LEÃO E SILVA, C.J.; ANDRADE, M. O.; FALCÃO, V.A.; SILVA, C.F.A. Subsidized Regional airlines as a sustainable development mechanism for remote locations heavily dependent onair transportation. Journal of Sustainable Development, Vol. 14, Nº 4, 2021.

METRASS-MENDES, A.; NEUFVILLE, R. de; COSTA, A. Air accessibility in Northern Canada: prospectos and lesson for remoter communities. ERSA conference papers ersa11p1647, European Regional Science Association, 2011.

NEGRI, N.A.R; BORILLE, G.M.R.; FALCÃO, V.A. 2019. Acceptance of biometric technology in airport check-in. Journal of Air Transport Management 81 (2019) 101720, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101720>

NEUFVILLE, R. de. Le devenir des aéroports secondaires: bases d'un réseau parallèle de transport aérien? Les Cahiers Scientifiques du Transport, n. 47, p. 11- 38, 2005

SAC - Secretaria de Aviação Civil. Aviação Regional. Convênios PROFAA. Brasília: Secretaria de Aviação Civil, 2016.

SMYTH, A.; CHRISTODOULOU, G.; DENNIS, N.; AL-AZZAWI, M.; CAMPBELL, J. Is air transport a necessity for social inclusion and economic development? Journal of Air Transport Management 22, pages 53-59, 2012. < http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.01.009>

TRAIN, K.E., 2009. Discrete Choice Methods with Simulation, vol. 2 Cambridge University.US Government. Public Law 115-254, 2009.

SAFETY MANAGEMENT SYSTEM IN AERONAUTICAL MAINTENANCE: THE BRAZILIAN EXPERIENCE

Francis Ferronato, Pedro Paulo Andrade Júnior
Universiade Federal de Santa Catarina

*** Corresponding author e-mail address**: francisferronato@hotmail.com

PAPER ID: SIT2199

ABSTRACT

This article presents an analysis of operational safety management in aircraft maintenance, a crucial element in ensuring flight safety and safeguarding aircraft integrity. Despite significant efforts to maintain high safety standards in aircraft maintenance, there are still gaps in understanding and effectively implementing safety procedures. Identifying opportunities for improvement is essential to bridge these gaps. This article aims to delineate the challenges associated with safety management in aeronautical maintenance operations and put forth best practices to enhance the Brazilian aeronautical sector's performance in this critical domain. To accomplish this objective, a comprehensive review of literature and research sources was conducted to address the current challenges and international best practices pertaining to aircraft maintenance safety. The research methods employed encompass both qualitative and quantitative approaches, utilizing applied methodologies. The findings underscore the pivotal role of cultivating an operational safety culture within aeronautical maintenance organizations and the imperative of adhering to legislation, airworthiness guidelines, and Brazilian civil aviation regulations. Furthermore, the research emphasizes the significance of robust risk decision-making, effective oversight of the operational safety management manual, meticulous management of emergency response plans, continuous staff training, reduction of rework rates, and adept management of maintenance personnel. Based on these findings, it is deduced that strengthening operational safety management in aircraft maintenance in Brazil can be achieved through the implementation of identified best practices. These practices should be tailored to address the specific challenges encountered within the sector, ultimately aiming to ensure the safety and efficiency of aeronautical operations within the country.

Keywords: Operational Safety Management System, Aircraft Maintenance, Risk, Regulation, Continuous Improvement, Rework Index.

ACKNOWLEGDEMENTS

This article serves as a tribute to my dear uncle, Fernando A. Zancanella, who, unfortunately, is no longer with us. A natural-born engineer, he consistently encouraged me to study and believed in my potential. This publication pays homage to his positive influence on my academic and professional journey. Even in his absence, his legacy of wisdom and support continues to inspire me to move forward with determination.

2. INTRODUCTION

Aircraft maintenance workshops play a critical role in ensuring the safe operation of aircraft. The management of operational safety in maintenance is a fundamental concern to avoid accidents and incidents, not only for airlines, air taxis, executive aviation, general aviation, agricultural aviation but also for the National Civil Aviation Agency (ANAC). However, this management faces challenges that demand effective and efficient solutions. Among the observable challenges, one stands out: the composition of the average Rework Index (RI) that is periodically prepared by the aeronautical maintenance facility (OM) can be analyzed through the Operational Safety Performance Indicator (IDSO) of (OM), which is governed by RBAC 145.

Operational safety management is vital to ensure the effectiveness and efficiency of aircraft maintenance processes. Among the primary challenges are establishing an operational safety culture, managing risks, maintaining technical control over maintenance, qualifying and training the professionals involved, along with implementing quality management and preventive maintenance. Furthermore, it's essential to account for ongoing technological advancements and regulatory changes, necessitating the continuous update of processes and procedures.

This article aims to explore the challenges and best practices in operational safety management within the context of aircraft maintenance, with a strong focus on legal compliance to enhance operational safety. It will provide examples of legal requirements that companies must adhere to in accordance with industry standards and recommended practices. Additionally, the article will address the key challenges confronting this sector. The objective is to offer information that can facilitate the enhancement of operational safety management processes in aircraft maintenance, subsequently reducing instances of maintenance rework, accidents, and aviation-related incidents.

3. METODOLOGY

Research Approach Used: This research will employ a desk research approach with a specific focus on Brazilian legislation and international standards. The primary aim is to identify and assess best practices and the primary challenges associated with operational safety management in aircraft maintenance. The research will encompass an examination of processes employed by aircraft maintenance companies, encompassing aspects such as the cultivation of an operational safety culture, adherence to legal requirements, compliance with airworthiness guidelines, decision-making processes, and the control of Operational Safety Management.

The theoretical foundation for data collection in this research is grounded in various authoritative sources, including ANAC legislation, accessed through the Portal da Legislação do Planalto. This encompasses the Brazilian Civil Aviation Regulations (RBAC), guidelines, standards, and annexes of the International Civil Aviation Organization (ICAO), Supplementary Instructions (IS), materials from the brazilian Center for Investigation and Prevention of Aeronautical Accidents (CENIPA), as well as resources from the Federal Aviation Administration (FAA). The research will involve comprehensive analysis of technical and regulatory documents to gather pertinent data related to operational safety management in aircraft maintenance. A thorough bibliographic and documentary review will be conducted to identify crucial concepts, regulations, standards, and procedures.

A systematic analysis of survey data was meticulously conducted in strict accordance with data collection standards, relying on highly reputable sources. The theoretical framework, pertaining to legislation applied in Brazilian aviation, was sourced from the following official websites: ANAC, CENIPA, and Planalto. International standards were obtained from the official websites of ICAO and FAA. In the development of the tolerance index for risk and hazard assessment, IS 145.241-001 served as the foundational basis. The author personally created a Python code based on this standard, aided by natural language processing. This code incorporates inputs for probability and severity, allowing for the determination of risk levels and the corresponding actions required for each classification.

Below are the steps followed in data collection and the sources utilized for the study

on Challenges and Best Practices in aircraft maintenance. In accordance with the research's overarching objective, criteria for study selection and data analysis were established based on specific objectives aimed at investigating various facets of operational safety management in aeronautical maintenance. This encompasses the examination of regulations and pertinent technical standards, the processes and procedures implemented by aircraft maintenance companies, primary challenges encountered, best practices for ensuring operational safety, the efficacy of preventive measures, and potential enhancements.

4. ANALYSIS OF BEST PRACTICES APPLICABLE TO THE BRAZILIAN AERONAUTICAL SECTOR.

In Brazil, aircraft maintenance legislation falls under the purview of ANAC, regulated through RBAC 145. Within RBAC 145, Chapter 5, Section A, item 5.5 stipulates that the aeronautical maintenance facility (OM) is required to establish and maintain documented procedures for the execution of their activities (BRASIL, 2013).

These procedures must be regularly updated to incorporate alterations in technical and regulatory requisites, as well as best practices in maintenance. Additionally, ANAC periodically releases service bulletins and airworthiness directives, containing updated information regarding maintenance procedures and modifications to aeronautical equipment, systems, and components (BRASIL, 2013).

Another pertinent legislation is Law 7.565/86, which lays out the Brazilian Aeronautics Code. This law delineates the regulations and safety prerequisites for Brazilian civil aviation and delineates the responsibilities of ANAC, air operators, and OMs concerningaviation safety (BRASIL, 1986).

In essence, aeronautical OMs are mandated to adhere to the regulations and requisites set forth by ANAC, necessitating the continuous revision of maintenance procedures to stay abreast of technological and regulatory shifts in the industry (BRASIL, 1986).

Law 7.565/86 serves as the primary legislation governing the civil aviation sector in Brazil. While it may not specifically address the continuous updating of processes and procedures in aeronautical maintenance, this law does underscore the necessity for civil aviation activities to be conducted in accordance with the norms and standards set forth by the Brazilian aeronautical authority (BRASIL, 1986).

Indeed, in accordance with the Law that established ANAC, Law 11.829/05, it is the Brazilian Civil Aviation Authority (AAC) that holds the responsibility for regulating and overseeing the aviation sector. This authority has instituted numerous rules and regulations pertaining to aircraft maintenance, with the primary objective of ensuring adherence to safety standards (BRASIL, 2005).

This includes the imperative for aircraft maintenance companies to maintain their processes and procedures in a current state, in alignment with applicable standards and regulations. It is imperative to underscore the significance of aircraft maintenance companies remaining vigilant regarding technological and regulatory developments, and consistently updating their processes and procedures. This commitment not only ensures safety but also enhances the efficiency of maintenance operations (BRASIL, 2005).

The Brazilian Department of Air Space Control (DECEA), acting as the Aeronautical Authority (AA), plays a pivotal role in overseeing and managing Brazilian airspace, ensuring the smooth flow of air traffic operations (CENIPA, 2023).

DECEA's responsibilities encompass airspace monitoring, coordination of airport activities, establishment of flight routes, and provision of crucial air traffic information. Additionally, DECEA is committed to upholding stringent safety standards, deploying advanced technologies, and collaborating with aviation authorities to enhance the safety and efficiency of Brazilian airspace (CENIPA, 2023).

DECEA's dedicated efforts contribute significantly to the safety and efficiency of aviation operations in Brazil, minimizing risks, optimizing routes, and facilitating seamless air travel (CENIPA, 2023).

5. SEARCH RESULTS

For ICAO, established in 1944, operational safety management in aircraft maintenance constitutes a collection of activities directed at the identification, evaluation, and control of risks associated with aircraft maintenance. Its overarching goal is to ensure the safety and efficiency of air operations. This framework encompasses the formulation and implementation of policies, processes, and procedures designed to guarantee that aircraft maintenance operations align with the safety standards mandated by the organization and regulatory bodies (ICAO, 2013).

For ANAC, the regulatory and oversight body for Brazilian civil aviation, established in 2005, Operational Safety Management in Aeronautical Maintenance encompasses the practices embraced by aeronautical maintenance companies to ensure the safety of maintenance operations and, by extension, the operational safety of flights. This management framework encompasses the formulation of operational safety policies, the establishment of procedures and practices, the identification and analysis of risks, the implementation of control measures, and the continuous monitoring of the effectiveness of these measures. ANAC has established specific rules and regulations designed to uphold operational safety in aircraft maintenance. The agency assumes the role of supervising maintenance companies to verify their adherence to these rules and regulations (ANAC, 2023).

ICAO Annex 19, initially published in 2013 under the title "Global Operational Safety Management," serves as a foundational document that outlines the regulatory framework for the global implementation of operational safety management. It sets forth the standards and requisites for operational safety management, offering guidance on the creation and implementation of Safety Management Systems (SMS) within aviation-related organizations. The primary aim of Annex 19 is to foster collaborative efforts among various stakeholders, including governments, civil aviation authorities, airlines, and other aviation service providers, to systematically and efficiently manage operational safety, thereby reducing the risks of accidents and air incidents. In essence, Annex 19 serves as a comprehensive reference for aviation safety management, providing a comprehensive set of standards and guidelines for the effective implementation of SMS throughout the industry (ICAO, 2016).

The ICAO Safety Management Manual (SMM) is a guide that delineates principles for the establishment of the SGSO Operational Safety Management System within aeronautical organizations. This document is designed to oversee operational safety in all aspects of aviation, including aircraft maintenance. The manual offers an exhaustive overview of the foundational components of SMS, encompassing safety policy and objectives, risk management, safety culture, communication, and data analysis. The ICAO SMM stands as a crucial reference for organizations seeking to institute or enhance an operational safety management system within their aircraft maintenance operations (ICAO, 2013).

5.1. MAIN CHALLENGES IDENTIFIED IN THE MANAGEMENT OF OPERATIONAL SAFETY OF AIRCRAFT MAINTENANCE IN THE BRAZILIAN CONTEXT

5.1.1. GUARANTEE OF EFFICIENCY AND EFFECTIVENESS

One of the main laws that deal with operational safety management in aircraft maintenance is RBAC 121, which establishes the rules and procedures for the operation of air transport of passengers and cargo in Brazil (BRASIL, 2010).

Another important standard is the ICAO SMS, which is a set of rules and guidelines for the management of operational safety in civil aviation. SMS is mandatory for airlines worldwide and is regulated by ICAO Annex 19 (ICAO, 2016).

RBAC 145 EMD 07, issued by ANAC, establishes the minimum requirements for the certification of aircraft maintenance companies and ensures that maintenance

activities are carried out in accordance with operational safety standards. The regulation defines the responsibilities of regulatory agencies and maintenance companies, addresses the procedures and processes necessary for the certification, maintenance and updating of maintenance companies, in addition to describing the appropriate aeronautical maintenance practices and the necessary safety measures to avoid accidents. The RBAC 145 is essential to ensure safety in aircraft maintenance and passenger confidence in airlines (BRASIL, 2013).

RBAC 153 establishes the requirements for the implementation of risk management programs in air transport companies, including aircraft maintenance companies. The objective is to guarantee operational safety, the prevention of accidents and incidents and the continuous improvement of processes related to aircraft maintenance. The standard defines the structure and elements that must be considered in risk management programs, such as the identification, analysis and evaluation of risks, the implementation of mitigation measures, the monitoring and continuous review of the program. In addition, the resolution establishes the obligation for the airline to designate an operational safety manager responsible for implementing and maintaining the risk management program (BRASIL, 2012).

In order to inspect an aircraft in a Brazilian Maintenance Workshop (OM), in addition to preventive or corrective maintenance, it is essential to collect data from the manufacturer's Airworthiness Directives (DA), Airworthiness Directives (AD), both for aircraft Brazilians and foreigners. This data can be obtained through DA and available on the websites of ANAC, FAA, European Union Aviation Safety Agency (EASA) and others, as well as through bulletins issued by the manufacturer (ANAC, 2023).

According to Annex II - IS 39-001A of ANAC, the Airworthiness Directive Compliance Form (FCDA) has an acceptable primary record format for compliance with an Airworthiness Directive (DA). ANAC ADs are legal prescriptions that apply to aircraft, aircraft engines, propellers and equipment. These documents are issued by ANAC and are mandatory. They establish, as appropriate, inspections, modifications, instructions, procedures and limitations applicable to aeronautical products, when an unsafe condition exists in those products and that condition is likely to exist or develop in other products of the same type design. (BRASIL, 2019).

When an aeronautical component fails, the manufacturer issues a service bulletin and the aeronautical authority issues a DA. In maintenance shops, it is mandatory to comply with the FCDA in any overhaul. It is necessary to perform them when the guidelines of the country of origin and where the aircraft is operating are fulfilled (BRASIL, 2019).

3.1.1 RISK MANAGEMENT

ANAC's RBAC 153, in addition to establishing requirements for the identification, analysis and mitigation of risks in air operations, also addresses risk management in aircraft maintenance. It establishes that MOs must implement a risk management system to identify and manage the risks associated with the maintenance of aircraft, components and aeronautical equipment. The objective is to guarantee the operational safety of the aircraft and minimize the risks associated with maintenance. In addition, RBAC 153 establishes requirements for recording occurrences and incidents related to aircraft maintenance, aiming at the continuous improvement of processes and improvement of operational safety (BRASIL, 2012).

ICAO, in its Annex 19, also addresses risk management as a fundamental element of operational safety management, establishing guidelines and requirements for the implementation of safety management systems in civil aviation organizations (ICAO, 2016).

3.2 IDENTIFICATION OF SPECIFIC IMPROVEMENT OPPORTUNITIES FOR OPERATIONAL SAFETY IN BRAZILIAN MAINTENANCE

3.2.1 SAFETY CULTURE, QUALIFICATION AND TRAINING

Operational safety culture, guided by ICAO's Annex 19 - Safety Management, plays a pivotal role. Airlines implement the Operational Safety Program (PSOE-ANAC), which fosters a safety culture, identifies and manages risks, and continuously evaluates its effectiveness (ANAC, 2015).

RBAC 142 imposes crucial training center requirements for airline employees, including those in aircraft maintenance. The primary aim is to ensure that employees are well-equipped to identify and manage operational risks in all company activities, particularly in aircraft maintenance. This regulation also underscores the need for regular assessments of training programs to maintain their effectiveness (BRASIL, 2012).
RBAC 145 assumes significance as it lays down the standards and procedures for certifying aircraft maintenance workshops. Qualification and training are emphasized in RBAC 145, with a strong emphasis on continuous learning. This includes theoretical knowledge and practical skills while incorporating the principles of operational safety, risk management, and sound management practices. Competency goes beyond technical aspects and encompasses a holistic understanding of the aviation business (BRASIL, 2013).

RBAC 121 EMD 16, an ANAC regulation, governs passenger and cargo air operations by airlines. Among its many requirements, it underscores the paramount importance of qualification and training for professionals engaged in aircraft maintenance (BRASIL, 2010).

In summary, these regulations highlight the critical role of qualification and training in maintaining operational safety. Adequate training programs, including comprehensive records of activities and performance evaluations, are imperative to equip aviation professionals with the necessary skills for safe and efficient operations (BRASIL, 2010).

3.2.2 PREVENTIVE MAINTENANCE

In Brazil, aircraft maintenance professionals must hold a Technical Qualification Certificate, as mandated by RBAC 65 and amendment 00. These certificates cover airframe, powerplant, and avionics qualifications. Airframe certification encompasses skills related to pressurization, air conditioning, pneumatic and hydraulic systems, aircraft structure, and helicopters. Powerplant qualification involves working with various general aviation engines, propellers, rotor systems, and related components. Avionics qualification focuses on electrical and electronic aircraft components, including navigation and communication systems, as well as electrical and radar systems (BRASIL, 2018).

RBAC 43 details aviation regulations in Brazil regarding preventive maintenance, reconstruction, and alterations. It encompasses aircraft, airframes, engines, propellers, accessories, components, and parts. This rule applies universally to aircraft with Brazilian airworthiness certificates, with an exception for those authorized by ANAC for experimental flight. Notably, it covers all life-limited parts, even when removed from certified products. Moreover, RBAC 43 empowers ANAC to grant authorizations to individuals holding foreign certificates or licenses, enabling them to perform specific maintenance, preventive maintenance, reconstruction, or alterations when no RBAC 145-certified organization is available. Essentially, RBAC 43 underscores the pivotal role of preventive maintenance in upholding aircraft operational safety, establishing requisite regulations for these procedures (BRASIL, 2013).

RBAC 91 establishes regulations for civil aircraft operations in Brazil and abroad, covering various aspects, including aircraft maintenance and alterations. It applies to all individuals on board aircraft complying with these rules, including Brazilian airlines, foreign companies, and private air operators. However, it's crucial to note that ANAC is not responsible for overseeing the regulations set by DECEA as mentioned in this rule (BRASIL, 2020).

Subpart J of RBAC 135 establishes the requirements for maintenance, preventive maintenance and alterations in civil aircraft in Brazil. The regulation defines the applicability and responsibilities for airworthiness, in addition to requiring the documentation and reports necessary to ensure the safety of the

operation. Requirements are established for facilities, resources, equipment, tools, materials and technical data for maintenance, as well as the organization, preventive maintenance programs and training required for mandatory inspection personnel. Compliance with aircraft inspection programs, analysis and ongoing supervision is also required, in addition to the authority to perform, approve maintenance and changes. Record keeping and transfer records are required to ensure traceability of airworthiness documentation (BRASIL, 2010).

Subpart L of RBAC 121 establishes requirements for maintenance, preventive maintenance, modifications and repairs of aircraft. All certificate holders must follow these requirements, except in cases where ANAC allows deviations to allow aircraft components to return to service after being subjected to maintenance, modification or inspection abroad by persons not qualified by ANAC. In such cases, the certificate holder must ensure that the work has been carried out in accordance with the manual or manufacturer's standards (BRASIL, 2010).

In addition, by February 26, 2022, the resources and facilities for maintenance, preventive maintenance, modifications and repairs owned and/or contracted by the certificate holder must be equal to or greater than the requirements of RBAC 145, cited above, to certify an aeronautical workshop approved. This includes the certificate holder's inspection system, which must be adequate (BRASIL, 2010).

The certificate holder is primarily responsible for the airworthiness of its aircraft and for performing maintenance, preventive maintenance, modifications and repairs on its aircraft, in accordance with its manual and RBAC standards. Although you can hire other people to perform maintenance services, this does not relieve you of your responsibility. (BRASIL, 2010).

To carry out any maintenance, preventive maintenance, modifications or repairs, the certificate holder and any person contracted by him must have an organization adequate to the tasks to be performed. In addition, to carry out mandatory inspections, the certificate holder and anyone employed by the certificate holder must have an adequate organization (BRASIL, 2010).

Finally, each certificate holder must establish a program of inspections and a program covering maintenance, preventive maintenance, modifications and repairs to ensure that the work is carried out as stipulated in its manual, that qualified personnel, adequate facilities and equipment are in place. for the proper performance of the services, and that each aircraft released for flight is in safe operating condition (BRASIL, 2010).

3.2.3 MONITORING PROCESS FOR THE REWORK RATE

The main objective of IS 145.214-001 - Revision B is to detail criteria and suggestions to be used as acceptable approaches for adherence to the requirements mentioned in RBAC 145 referring to the creation, execution and preservation of the SMS of the Aeronautical Product OM that hold certifications issued in accordance with with such regulation or that request this certification from ANAC (BRASIL, 2018).

According to IS 145.214-001, element 3.1 of the Operational Safety Management System requires aviation organizations to develop and maintain a process that ensures the monitoring and measurement of operational safety performance. This process must validate the assessment, control of risks to operational safety and comply with the scalability criteria established in subsection 5.2 of the SMS. The Responsible Manager must establish operational safety goals to achieve the organization's objectives. These targets should take into account the resources available to implement planned actions in favor of operational safety. Metrics used to assess operational safety performance must be expressed through indicators, which can be qualitative or quantitative, based on data and information relevant to the objectives associated with each of these indicators. The performance of operational safety must be evaluated with reference to the indicators and targets established in the organization's SMS (BRASIL, 2018).

The set of indicators mentioned in item “c” of this paragraph includes the Rework Index (RI), which is an important aspect in terms of operational safety. The IR is defined

based on items “d” and “e” of subparagraph D2.8.4 (Appendix D of this IS) and must be periodically informed to ANAC by the responsible Maintenance Workshop (OM). The IR consists of the total number of reworks due to customer complaints and returns referring to services that had Approval for Return to Service (APRS) by OM itself, divided by the total APRS in the period considered (BRASIL, 2018).

It is considered that the IR can be an indication of errors or maintenance failures that could have been avoided, since a rework service is maintenance intended to correct a problem that occurred in an article that previously underwent a maintenance service, some of the challenges are related to the factors contributing to the IR, they can be: negligence, malpractice, imprudence, erroneous decision-making by Responsible Managers, erroneous decision-making by agents involved with aviation, lack of knowledge, failure in training , misuse of the checklist, non-use or misuse of prevention reports, non-compliance with processes, rules, standards, instructions, regulations and legislation in force (BRASIL, 2018).

The IR calculation must be done monthly, using the $IR = r \div APRS \times 100\%$, where r is the number of reworks measured in the reference month and APRS is the number of approvals for return to service measured in the same period. The IR must be associated with an operational safety objective and an operational safety goal, according to subparagraph 5.6.1.1, items “d” and “f”, respectively. The monthly values of the IR must be communicated to ANAC every three months, following the established reference months: April (for the months of January, February and March), July (for the months of April, May and June), October (for the months for the months of July, August and September) and January (for the months of October, November and December). The IR must be filed and sent to ANAC by the 15th of the reference month for communication, together with the last three calculated results, in case there is correction in the values due to late information from customers regarding rework (BRASIL, 2018).

Within the context of the “SGSO para Todos” program, the National Civil Aviation Agency (ANAC) established the Revision Index (RI) as the parameter for evaluating the performance of operational safety in OM. This definition was presented in subparagraph 5.6.3.1 (f) of ANAC Service Instruction 145.214-001B, which also establishes the obligation to calculate the IR monthly and report its results quarterly to ANAC. To follow trends in IR values and the volume of Revisions, the pointers of the meters are used as indicators. The current reference value of the IR is based on the average of the last 12 months of the indicator. It is important to emphasize that the objective of monitoring the OM indicator by ANAC is not to punish, and the values obtained will not be disclosed individually (ANAC, 2023).

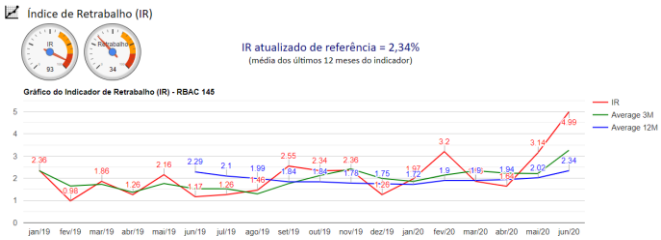


Figure 1 – Operational Safety Performance Indicator. Source: ANAC.

This IDSO considers the IR for the last 12 months with a 2.34% reference, observed in the graph, detrimental to aviation. Common causes of rework in aircraft maintenance include poor planning, inadequate technician training, communication issues, inspection lapses, parts supply problems, procedural standardization gaps, and documentation shortcomings. These factors lead to errors and omissions during maintenance, necessitating rework for issue correction. Identifying and rectifying these problems is vital for efficiency and reducing RI. Additionally, the OM should report total rework amounts and APRS numbers, adhering to the recommended communication format. ANAC's monitoring of this indicator is not punitive, and individual values will not be disclosed (ANAC, 2023).

Finally, it is recommended that the OM also monitor the processes of the Quality Control System of the Aircraft Maintenance (RBAC 145.211) through performance indicators, which will facilitate decision-

making on possible corrective actions. Knowing the performance of the SCQ processes, it will be possible to understand the behavior over time of the IR (BRASIL, 2018).

The SGSO (Safety Management System) continuous improvement process is a vital requirement. The organization must develop and maintain a process that ensures ongoing monitoring and assessment of SMS effectiveness, aligned with the scalability criteria outlined in subsection 5.2 of this IS. This is accomplished by employing the following methods: XII - reevaluation of its safety policy and operational objectives; XIII - analysis of findings from both internal and external audits; XIV - examination of operational safety data; XV - implementation of corrective and preventive measures; and XVI - in-depth evaluation of the outcomes and influences resulting from operational safety management (BRASIL, 2018).

According to ANAC's IS 145-001 Revision E, it aims to present guidelines and instructions for the OM certification process of aeronautical products in Brazil, in accordance with the standards established by RBAC 145. Procedures and guidelines are provided for carrying out maintenance services, preventive maintenance and alterations, aiming to guarantee the safety and conformity of the activities carried out by organizations certified by ANAC (BRASIL, 2020).

The Technical Responsible (RT) is a professional registered with the corresponding supervisory board and who assumes technical responsibility for the services provided by a legal entity. This responsibility is in line with standards set by professional councils and the additional requirements of Appendix A of RBAC 145 (BRASIL, 2020).

The Responsible Manager (RM) is vital in aeronautical product maintenance organizations. They authorize or deny operation expenses, ensuring compliance with safety rules. The RM aligns with the organization's articles of incorporation and promotes operational safety policies. They oversee operations to meet regulations. ANAC accepts the RM, holding primary responsibility (BRASIL, 2020).

The SMS Management Officer (GSO) is a vital role within the maintenance organization's structure. They must meet specific criteria, including direct access to the Accountable Manager, competence, experience, and training established by the maintenance organization certificate holder to fulfill their role as required by ANAC regulations. Access to operational safety data and information is also essential for the GSO to effectively manage operational safety (BRASIL, 2013).

The GSO primarily oversees and updates the Operational Safety Management Manual (MGSO). This manual encompasses operational safety policies, procedures, and objectives, delineates the responsibilities of operational safety personnel, includes the Emergency Response Plan (PRE), manages documentation, conducts hazard identification processes, evaluates controls and risks, monitors and measures operational safety performance, handles change management, focuses on continuous SMS improvement, oversees subcontracted activities, promotes operational safety, addresses Human Factors, and encompasses Civil Aviation reports, minutes, forms, and emergency contacts, among others (BRASIL, 2013).A worldwide widespread method for mitigating accidents and adapted for Brazil, the Risk Prevention Program in Civil Aviation (RELPREV) has as its main purpose to prevent accidents and incidents in Brazilian civil aviation, through the identification and management of risks. For this, RELPREV seeks to promote a culture of prevention, establishing guidelines and procedures for the prevention of operational, environmental and safety risks in air transport (CENIPA, 2023).

RELPREV is a voluntary reporting system that allows any individual to report any event, occurrence, condition or circumstance that may affect flight safety or air operations. It is possible to report anonymously, but if the reporter chooses to identify himself, he will be informed about how the information will be handled (CENIPA, 2023).

The program also aims to improve operational safety, reduce the number of air accidents and incidents, promote the exchange of information between airlines and regulatory bodies, and encourage aviation professionals' awareness of the importance of operational

safety. In addition, RELPREV aims to contribute to compliance with national and international standards for operational safety in civil aviation (CENIPA, 2023).

Raising awareness about the use of RELPREV is extremely important for mitigating aeronautical accidents. Professionals involved in aviation-related activities must be aware that the voluntary reporting of events, occurrences, conditions or circumstances with the potential to affect Flight/Operational Safety is a fundamental tool to identify and resolve safety issues in a timely manner (CENIPA, 2023).

By using RELPREV, professionals contribute to the creation of a safe and transparent environment, allowing the competent authorities to assess the reported information, adopt appropriate preventive and corrective measures. In addition, voluntary reporting is a form of continuous learning, as it allows the analysis of situations that may have gone unnoticed, as well as the identification of trends and risk patterns (CENIPA, 2023).

Highlighting RELPREV's non-punitive nature, the rapporteur's identification is optional, but if chosen, the professional receives information on data handling. Thus, companies and aviation stakeholders must promote RELPREV usage to ensure air operation safety (CENIPA, 2023).

6. REFERENCES

ANAC. (2023). Portal da Agência Nacional de Aviação Civil. Retrieved April 19, 2023, from https://www.anac.gov.br/

ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil). (2015). PSOE-ANAC – Programa de Segurança Operacional Específico da Agência Nacional de Aviação Civil. [S.L.]. Retrieved April 16, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/planos-e-programas/psoe-anac/@@display-file/arquivo_norma/PSOE-ANAC.pdf

BRASIL. Anac. (2019). IS nº 39-001. Diretrizes de Aeronavegabilidade. [S.L.]. Retrieved June 4, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-39-001/@@display-file/arquivo_norma/IS39-001C.pdf

BRASIL. Anac. (2020). IS nº 145-001. Certificação de organizações de manutenção domésticas. [S.L.]. Retrieved April 28, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-145-001

BRASIL. Anac. (2018). IS nº 145.214-001. Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional em Organizações de Manutenção de Produto Aeronáutico. [S.L.]. Retrieved April 13, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-145-214-001

BRASIL. Anac. (2013). RBAC nº 43. Manutenção, Manutenção Preventiva, Reconstrução e Alteração. [S.L.]. Retrieved April 20, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/boletim-de-pessoal/2014/49/anexo-ii-rbac-43-emenda-01

BRASIL. Anac. (2018). RBAC nº 65. Licenças, habilitações e regras gerais para despachante operacional de voo e mecânico de manutenção aeronáutica. [S.L.]. Retrieved April 22, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-65/

BRASIL. Anac. (2020). RBAC nº 91. Requisitos gerais de operação para aeronaves civis. [S.L.]. Retrieved April 14, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-91

BRASIL. Anac. (2012). RBAC nº 142. Certificação e requisitos operacionais: centros de treinamento de aviação civil. [S.L.]. Retrieved June 4, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao

SELECTION OF HIGH RISK CATEGORIES OF OCCURRENCES USING AN INTEGRATED MULTI-CRITERIA DECISION MAKING AHP-TOPSIS METHODOLOGY IN THE CONTEXT OF THE BRAZILIAN NATIONAL AVIATION SAFETY PLAN

Ronaldo Wajnberg Gamermann*, Paulo Henrique Iengo Nakamura
National Civil Aviation Agency - ANAC Brazil

*** Corresponding author e-mail address:** ronaldo.gamermann@anac.gov.br

PAPER ID: SIT2316

ABSTRACT

The aviation industry plays a critical role in the global economy, necessitating a comprehensive approach to address safety challenges. This paper presents an integrated methodology combining the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) for the systematic selection of High Risk Categories of Occurrences (HRC) in civil aviation. By leveraging the strengths of both methodologies, the proposed framework facilitates a holistic evaluation of risk factors inherent to the aviation domain. The study aims to provide a methodology to enhace the brazilian National Aviation Safety Plan (NASP) by identifying critical HRC and prioritizing them based on their risk levels, incorporating expert judgment and data-driven decision-making. Previous studies in related domains have demonstrated the efficacy of integrated multi-criteria decision-making methodologies. The integration of AHP and TOPSIS methodologies presents a robust and systematic approach to address aviation safety challenges, with opportunities for future research to expand decision criteria, incorporate real-time data, and establish feedback loops to continually enhance safety performance.

Keywords: Aviation Safety Management, MCDM, AHP, TOPSIS, High Risk Categories of Occurrences - HRC.

ACKNOWLEDGEMENTS

This is a working paper, and hence it represents research in progress. This paper represents the opinions of the authors, and is the product of academic research. It is not meant to represent the position or opinions of ANAC, nor the official position of any staff members.

1. INTRODUCTION

The aviation industry is undoubtedly one of the most vital sectors in the global economy, catering to millions of passengers and freight shipments daily. However, the industry faces numerous safety challenges, requiring comprehensive risk assessment and mitigation strategies. Considering the need to allocate available resources most effectively, it becomes essential to prioritize areas of higher risk.

In recent years, researchers and industry experts have recognized the importance of employing rigorous methodologies to identify and prioritize risks areas for developing robust aviation safety plans.

The Global Aviation Safety Plan (GASP) (ICAO, 2022) is a plan aimed at promoting and maintaining aviation safety in operations worldwide. It is developed by the International Civil Aviation Organization (ICAO), a specialized agency of the United Nations responsible for establishing standards and regulations for international civil aviation. GASP is a fundamental component of ICAO's Safety Management Program and defines global goals and strategies for aviation safety.

GASP is intrinsically related to the Regional Aviation Safety Plans (RASPs) and the National Aviation Safety Plans (NASPs). RASPs are developed at the regional level, taking into account specific regional characteristics and challenges, and align with the objectives of GASP. In turn, NASPs are developed at the national level, following the guidelines established by the corresponding RASP and GASP.

A crucial aspect of these safety plans is the identification of High Risk Categories (HRC). These are specific risk categories that are considered highly relevant in terms of aviation safety. The selection of HRCs is based on safety data analysis, recurrent incidents, and occurrence trends. These categories are chosen for priority attention and additional preventive measures to mitigate the associated risks. The identification and management of HRCs are an essential part of aviation safety plans and are vital for the continuous improvement of safety in aviation operations at the global, regional, and national levels.

The application of integrated multi-criteria decision-making approaches has emerged as a promising solution to address the complexities of HRC selection in the realm of civil aviation.

This paper explores the utilization of the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) integrated with the Analytic Hierarchy Process (AHP) for the systematic and effective selection of High Risk Categories in civil aviation. This approach combines the strengths of both methodologies, providing a well-rounded and holistic evaluation of risk factors inherent to the aviation domain.

The primary objective of this study is propose a method for priorization of High Risk Categories. By incorporating expert judgment, industry insights, data-driven decision-making, and by minimizing the influence of individual bias to the analysis, the proposed methodology aims to contribute to a proactive and targeted approach to effectively enhance aviation safety.

This study seeks to enhance the comprehension of integrated decision-making methodologies through their adaptation and application in the domain of civil aviation. By analyzing real-world data, collaborating with subject matter experts (SMEs), and building on existing research, this paper aims to provide significant contributions and valuable insights to the field of aviation safety.

2. LITERATURE REVIEW

Several previous academic papers have demonstrated the effectiveness of integrated multi-criteria decision-making methodologies in various domains. For instance, Smith et al. (2018) utilized an integrated AHP-TOPSIS methodology to assess risk in the oil and gas industry, providing valuable insights for risk management strategies. Additionally, Tarokh et al. (2017) applied a similar approach to prioritize high risk categories in airside operations in the aviation industry. The study highlights the importance of incorporating various criteria related to safety and evaluates their relative importance using TOPSIS. The findings contribute to enhancing safety mea-

sures and risk management strategies in aviation operations.

In the work of Marais et al. (2016), the authors present a hybrid approach that combines AHP and TOPSIS to select high risk categories in aviation safety management. The study focuses on integrating subjective expert opinions with objective data-driven criteria to prioritize risk categories effectively. The findings contribute to improving safety management practices and decision-making processes in the aviation industry.

An illustrative example of TOPSIS's efficacy can be seen in Chang et al. (2015), application of the method in airport safety assessment. They presented a ranked list of countermeasures, utilizing both objective data and expert judgments. The results from their study clearly demonstrated how TOPSIS aids decision-making by providing a well-defined prioritization of countermeasures.

In the work of Ammarapala & Luxhoj (2007), the authors demonstrate the effectiveness of an innovative collaborative decision-making approach designed to aid a team of senior decision-makers in recognizing, assessing, analyzing, and ranking critical risks within an organizational system. The study evaluates the outcomes of this collaborative technique when applied to real-world, high-risk scenarios like aviation safety risk management. The study assesses the reliability and effectiveness of the suggested collaborative approach, highlighting that it offers a way to circumvent the challenges associated with pairwise comparisons.

3. MATERIAL AND METHOD

We employed the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) as the method for ranking the HRCs in an importance list, integrated with the Analytic Hierarchy Process (AHP) for determining the weights of each criterion. We utilized data from Aeronautical Occurrences (Accidents, Serious Incidents, and Incidents) recorded in Brazil over the past 10 years, and made available by the Brazilian aeronautical accident investigation authority. The Table 1 presents the distribution of occurrences by event classification:

Table 1 Number of Occurrences by Classification Type

Classification Type	*Number of Occurrences*
Accidents	1,719
Serious Incidents	3,120
Incidents	733

For each occurrence, the classification performed by the Brazilian aeronautical accident investigation authority was identified, correlating it with the type of occurrence category according to the CAST/ICAO Common Taxonomy Team (CICCT, 2021), consisting of 36 categories. In the Brazilian historical data from the last 10 years, 33 categories have been observed. The following three categories have never been used: Cabin Safety Events (CABIN), Medical (MED) and Naviagation Errors (NAV).

Two occurrences were invalidated as there was no related occurrence category. It should be noted that the same occurrence can receive more than one type of occurrence category; therefore, the total number of categorized occurrence exceeds the number of occurrences, resulting in a total of 5,926 categories for the 5,570 occurrences during the period. The table 2 shows the frequency of occurrence for each category.

The occurrence category SCF-NP - System/Component Failure or Malfunction (Non-Powerplant) - is the most frequent, representing approximately 33% of all events. Categories such as SEC - Security Related, F-POST - Fire/Smoke (Post-Impact) - , and EVAC - Evacuation - proved to be rare events with only one occurrence in the last 10 years. Therefore, events within the first quartile of the occurrence distribution were excluded from the analysis. In other words, categories with fewer than 13 occurrences were not considered for classification purposes [SEC, F-POST, EVAC, LOLI, GTOW, ICE, UIMC, TURB, EXTL].

Stages of the integrated method

Definition of Criteria

The criteria for classifying HRCs were considered based on those commonly used by different civil aviation authorities, including ICAO, and

Table 2 Number of Occurrences by Classification Type

Occurrence Category	*Number of Occurrence*
SCF-NP	1930
SCF-PP	865
OTHR	545
LOC-G	374
RE	357
LOC-I	348
BIRD	261
ARC	215
CTOL	173
UNK	139
LALT	133
FUEL	102
GCOL	96
MAC	72
F-NI	62
RI	46
CFIT	38
ADRM	23
WILD	22
AMAN	18
ATM/CNS	18
WSTRW	16
RAMP	15
USOS	15
EXTL	12
TURB	11
UIMC	9
ICE	4
GTOW	2
LOLI	2
EVAC	1
F-POST	1
SEC	1

through consultation with experts in the field. In total, six criteria were used for evaluation: (C1) number of fatalities, (C2) number of occurrences, (C3) number of accidents, (C4) accident fatality rate, (C5) alignment with the Global Aviation Safety Plan (GASP), and (C6) alignment with the Regional Aviation Safety Plan (RASP).For this study, the regional plan used was the South America Safety Plan (SAMSP).

Normalization of Criteria

In this stage, the data for each criterion were normalized, considering the different scales and units. The data were normalized using L2 normalization, or Euclidean normalization. In this method, each data point is divided by the Euclidean norm (L2 norm) of the entire dataset or along a specific axis. Euclidean normalization preserves the direction and proportion of the original values but adjusts the scale so that the vector has a norm of 1.

$$Normalized\ Data = \frac{Data}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} Data_i^2}} \qquad (1)$$

Definition of Weights for Each Criterion

After normalization, weights are assigned to each criterion to reflect their relative importance in the decision-making process. The weights were determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. To do so, subject matter experts (SMEs) provided pairwise comparisons to determine the relative importance of these criteria. The scale used consists of 5 main values and 4 intermediate values. In Table 3, the importance table created by Saaty (2005).

The Table 4 shows the dual comparison matrix based on the quality criteria of the SMEs. Similarly, dual comparison matrices are created for all other criteria. It is evident that the predominance of the importance of the accident fatality rate (C4) compared to the other criteria, being more important than all others. On the other hand, the criteria of alignment with GASP (C5) and RASP (C6) were considered the least important.

Table 3 Rating Scale for Importance

Rating Number	*Definition*	*Description*
1	Equal importance	Both elements are equally important.
2	Weak importance of one over another	The first element is slightly more important.
3	Moderate importance of one over another	The first element is moderately more important.
4	Moderate plus importance of one over another	The first element is moderately more important, leaning toward strong importance.
5	Strong importance of one over another	The first element is significantly more important.
6	Strong plus importance of one over another	The first element is significantly more important, leaning toward very strong importance.
7	Very strong importance of one over another	The first element is very significantly more important.
8	Very, very strong importance of one over another	The first element is extremely more important.
9	Extreme importance of one over another	The first element is of the highest possible importance.

Table 4 Comparison Matrix of Quality Criteria

Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	7	2	1/4	6	4
C2	1/7	1	1/2	1/7	4	2
C3	1/2	2	1	1/6	7	3
C4	4	7	6	1	9	7
C5	1/6	1/4	1/7	1/9	1	1/2
C6	1/4	1/2	1/3	1/7	2	1

(C1) number of fatalities, (C2) number of occurrences, (C3) number of accidents, (C4) accident fatality rate, (C5) GASP, and (C6) RASP.

Table 5 Weighted Priority Vector

	Weights
C1	0.2222
C2	0.0768
C3	0.1334
C4	0.4863
C5	0.0300
C6	0.0513

(C1) number of fatalities, (C2) number of occurrences, (C3) number of accidents, (C4) accident fatality rate, (C5) GASP, and (C6) RASP.

Calculation of weighted priority vectors

From the pairwise comparisons, the prioritization vector is calculated. The priority vectors obtained for each criterion are multiplied by the values in the respective column in the dual comparison matrix for the relevant criterion. The sum of rows from these products gives weighted priority vector values. Table 5 shows the weights of each criteria.

Calculation of the Consistency Ratio

To assess the degree of consistency in the pairwise comparisons made by a decision maker, the Consistency Ratio was computed. This indicator is the result of dividing the Consistency Index (CI) by the Random Index (RI). The Consistency Index (CI) measures the extent to which the pairwise comparisons are consistent, while the Random Index (RI) serves as a reference value to determine the acceptability of the calculated CI.

The value of the Consistency Ratio was found to be 0.069, which is below the threshold of 0.1 typically considered acceptable. This result indicates that the pairwise comparisons are consistent.

Determination of Ideal and Anti-Ideal Solutions

In this stage, the ideal solution and the anti-ideal solution for each criterion were determined. The ideal solution represents the maximum value

for each criterion, while the anti-ideal solution represents the minimum value. For benefit criteria (where higher values are better), the ideal solution has the highest normalized value for each criterion, while for cost criteria (where lower values are better), the anti-ideal solution has the lowest normalized value for each criterion.

Calculation of Similarity Scores

Using the normalized data, weights, and ideal and anti-ideal solutions, the similarity score (closeness coefficient) for each alternative was calculated. The similarity score measures how similar each alternative is to the ideal solution. This was calculated using the Euclidean distance metric.

Ranking of Alternatives

Finally, alternatives were ranked based on their similarity scores. Alternatives with higher similarity scores are considered better and are ranked higher. The alternative with the highest similarity score is the best choice.

4. RESULTS

The Table 6 presents the results obtained when applying the method described in the previous section. In a preferential order, the 24 types of occurrences from the last 10 years of Brazilian aviation were ranked considering the six analysis criteria.

The results highlight some categories that deserve special attention in terms of aviation safety. The ”LOC-I” category (Loss of Control - Inflight) appears at the top of the list, indicating that accidents related to loss of control in flight are particularly concerning. This category has the highest number of fatalities. Additionally, it is relevant to both GASP and RASP, emphasizing its critical importance.

The second most critical category is ”CFIT” (Controlled Flight Into Terrain), which involves accidents in which an aircraft collides with terrain in a controlled manner. ”CFIT” has the highest accident fatality rate and is relevant to both GASP and RASP, highlighting the importance of preventive measures in this area.

In third place, we find the ”UNK” (Unknown) category, representing accidents with unknown causes. Like ”LOC-I” and ”CFIT”, ”UNK” has a high accident fatality rate. Since this category is used when something happened but the details are not known or insufficient to permit a more detailed classification, there is not much to be done proactively and therefore the UNK category should not be considered for HRC prioritization purposes.

The ”CTOL” (Collision with obstacles during take-off or landing whilst airborne) category ranks fourth. It deals with accidents related to collisions with obstacles during aircraft take-off or landing while in the air and has a substantial number of occurrences but a relatively lower accident fatality rate compared to the top categories.

The ”LALT” (Low Altitude Operations) category falls into the fifth position, with a considerable number of occurrences and accidents but a relatively lower accident fatality rate compared to the leading categories.

Regarding the less relevant categories, the ”BIRD” (Bird Strike) and ”WILD” (Collision Wildlife) categories occupy the 21st and 22nd positions, respectively. Both of these categories did not record any fatalities and have a accident fatality rate of 0. This indicates that, despite associated events, they did not result in significant human losses. However, this should not be a reason to disregard these events, as collisions with animals can damage the aircraft and require preventive measures such as wildlife control programs at airports.

The ”ADRM” (Aerodrome) category ranks 23rd and also does not record fatalities. However, like the previous categories, this category requires attention due to the potential for aircraft damage and disruptions in airport operations. The accident fatality rate is 0, but the aerodrome design, service, or functionality issues are crucial to safety.

Finally, the ”ATM/CNS” (Air Traffic Management/Communication System) category is at the bottom of the list. This category has no recorded fatalities and is the only category with no recorded events. This may suggest that safety

Table 6 Ranking of Occurrence Categories

Ranking	*Category*	*Number of Fatalities*	*Number of Occurrences*	*Number of Accidents*	*Accident Fatality Rate*	*GASP*	*RASP*
1	LOC-I	287	348	335	0.44	1	1
2	CFIT	53	38	36	0.58	1	1
3	UNK	108	139	124	0.45	0	0
4	CTOL	54	173	112	0.19	0	0
5	LALT	35	133	99	0.20	0	0
6	SCF-PP	111	865	397	0.06	0	0
7	SCF-NP	41	1930	123	0.01	0	1
8	FUEL	20	102	69	0.09	0	0
9	RE	3	357	175	0.01	1	1
10	LOC-G	8	374	181	0.01	0	0
11	OTHR	31	545	98	0.03	0	0
12	USOS	5	15	13	0.07	0	0
13	RAMP	1	15	3	0.07	0	0
14	WSTRW	1	16	5	0.06	0	0
15	AMAN	1	18	5	0.06	0	0
16	RI	1	46	7	0.02	1	1
17	ARC	3	215	72	0.01	0	1
18	MAC	3	72	4	0.03	1	0
19	GCOL	3	96	22	0.03	0	0
20	F-NI	1	62	5	0.02	0	0
21	BIRD	0	261	4	0.00	0	0
22	WILD	0	22	9	0.00	0	0
23	ADRM	0	23	3	0.00	0	0
24	ATM/CNS	0	18	0	0.00	0	0

and communication measures in the air traffic management system are effective, but it could also result from underreporting or improper categorization. The absence of events should not lead to complacency, as the safety of the air traffic management system is crucial for accident prevention.

Ranking categories based on specific criteria provides valuable information for prioritizing efforts and resources in aviation safety improvement. Categories with higher relevance and higher fatality rates may be priority targets for preventive and safety measures, while categories with lower fatality rates may indicate areas where safety measures have already been effective but still require ongoing vigilance. The analysis generally assists aviation authorities in making informed decisions to promote flight safety.

However, it is important to consider that the results presented encompass all types of segments in Brazilian civil aviation, including scheduled, non-scheduled, flight training, private, experimental flights, among others. With the aim of specifically investigating the scheduled commercial aviation segment, the same method was applied, filtering only this segment.

For the scheduled commercial aviation segment, during the study period, 1,252 aeronautical occurrences and 1,270 occurrence categories were recorded. The same procedure described in the previous section was applied, excluding rare occurrence categories, within the first quartile, in this case, categories with fewer than four events in the last 10 years. Table 7 presents the result obtained after prioritizing the categories considering the same six criteria.

It is notable that criteria (C1) "Number of Fatalities" and (C4) "Accident Fatality Rate" did not record any values. This is because, in the last 10 years in Brazilian civil aviation, there were no fatal accidents in scheduled commercial air transport. Furthermore, regarding the number of accidents, there is a total of only 18 occurrences, indicating a rare event in this operational segment.

Therefore, it becomes evident that the combination of criteria (C3) "Number of Occurrences" and (C3) "Number of Accidents" is the most relevant for prioritizing the occurrence categories. The SCF-NP category leads the list in first place, considering it is the category with the highest number of occurrences and accidents, even though it is not included in the GASP. In this regard, it is important to highlight that occurrences categorized as SCF-NP are common in the schedule commercial air trasport but not in the other avitaion segments which may indicate the underreporting of these events, reason why it appears only in the seventh position of Table 7.

In this segment, the OTHR category also appears to be relevant, indicating that a significant portion of the occurrences could not be classified into one of the categories specified in the CCIT taxonomy.

5. CONCLUSIONS

In the realm of civil aviation, prioritizing safety is a paramount concern that permeates all stages of aviation operations. Throughout this study, we have explored the crucial importance of identifying and defining high-risk categories in aviation, an essential process for directing resources and preventive actions effectively. According to Netjasov & Janic (2008), aviation, as a highly complex and constantly evolving sector, demands a meticulous approach to identifying high-risk areas to ensure the safety of passengers, crew, and aircraft.

The integration of the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) and AHP (Analytic Hierarchy Process) multi-criteria decision-making method has proven to be an effective approach for prioritizing high-risk categories in the context of civil aviation. The combination of these methods allowed for a more comprehensive and thorough evaluation, considering multiple relevant criteria. As a result, decision-making has become more precise and reliable, providing a solid foundation for identifying areas that require priority attention in terms of safety. This integrated approach has enhanced the accuracy of risk assessments and significantly contributed to improving accident prevention strategies and promoting a safer and more reliable aviation environment.

However, it is important to emphasize that

Table 7 Ranking of Occurrence Categories - Scheduled Commercial Segment

Ranking	*Category*	*Number of Fatalities*	*Number of Occurrences*	*Number of Accidents*	*Accident Fatality Rate*	*GASP*	*RASP*
1	SCF-NP	0	622	4	0	0	1
2	OTHR	0	164	3	0	0	0
3	RE	0	21	2	0	1	1
4	LOC-G	0	8	2	0	0	0
5	TURB	0	8	1	0	0	1
6	RI	0	21	0	0	1	1
7	WILD	0	4	1	0	0	0
8	ARC	0	17	0	0	0	1
9	SCF-PP	0	183	0	0	0	0
10	MAC	0	22	0	0	1	0
11	BIRD	0	100	0	0	0	0
12	F-NI	0	36	0	0	0	0
13	GCOL	0	12	0	0	0	0
14	ATM/CNS	0	11	0	0	0	0
15	ADRM	0	9	0	0	0	0
16	FUEL	0	7	0	0	0	0
17	WSTRW	0	6	0	0	0	0
18	RAMP	0	5	0	0	0	0

the criteria for evaluating categories must be tailored to the specific segment of aviation under study. It was observed that, in the case of scheduled commercial aviation, criteria related to lagging indicators add little value to the selection due to their low occurrence. In this regard, there is a need to choose other leading indicators for risk prioritization in this segment. This highlights the importance of flexibility and adaptability in risk assessment methodologies, ensuring that they meet the specific needs of each aviation subarea. The careful selection of relevant indicators, plays a fundamental role in the effectiveness of prioritizing high-risk categories, allowing for a more accurate approach aligned with the particularities of each operational context.

The ”OTHR” category stood out due to its significant frequency compared to the total categories, representing approximately 10% of the total set of occurrences. This fact prompts an important consideration regarding the classification of occurrences in the existing taxonomy. One possible interpretation, in line with the findings is that there may be an inherent difficulty in categorizing some occurrences within the established parameters, which, in turn, may indicate the need to consider creating new, more specific categories or refining existing classification criteria. Additionally, it is worth considering the possibility of that the complexity of some occurrences may make the task of specialists challenging during the classification process. This phenomenon underscores the importance of continuous review and adaptation of occurrence categories, as well as the proper training of professionals involved in their classification, to enhance accuracy and consistency in this fundamental process for aviation safety.

In general, it is understood that the method proposed in this study can serve as a valuable aid in decision-making for prioritizing high-risk categories in aviation. However, it is crucial to emphasize the need to adapt the evaluation criteria for each type of segment to be assessed. The method's flexibility and the ability to adjust criteria to match the specific operational context are essential elements to ensure its effectiveness.

As a possibility for future studies, there is an opportunity to explore even more refined approaches to prioritizing risk categories in aviation. One possible direction is the use of different criteria and assigning greater weight to

more recent data and events, considering the ever-changing dynamics of aviation. This would enable a more sensitive assessment of current safety trends.

Furthermore, conducting consultations with a larger group of experts, possibly through methods like the Delphi technique, could enrich the analysis by providing valuable insights into the importance relationships between the criteria used. The collective expertise of experts can contribute to a more comprehensive and accurate assessment of risk categories, resulting in well-informed prioritization decisions.One possibility is to leverage the results of occurrence risk analysis methods as an additional criterion, such as the European risk classification scheme (ERCS).

These potential research areas represent a promising path for the continuous improvement of risk management in civil aviation, reflecting the ongoing quest for more effective and adaptable approaches in the ever-evolving aviation sector.

References

Ammarapala, V. & Luxhoj, J. T. (2007). A collaborative multiâcriteria decision making technique for risk factor prioritization, Journal of Risk Research 10(4), 465–485.

Chang, Y.-H., Shao, P.-C. & Chen, H. J. (2015). Performance evaluation of airport safety management systems in taiwan, Safety Science 75, 72–86.

CICCT (2021). Aviation occurrence categories, CAST/ICAO Common Taxonomy Team 4.8.

ICAO (2022). Doc 10004, global aviation safety plan, Montreal: International Civil Aviation Organization (ICAO).

Marais, K. et al. (2016). A hybrid approach for selecting high-risk categories in aviation safety management, Safety Science 87, 78–89.

Netjasov, F. & Janic, M. (2008). A review of research on risk and safety modelling in civil aviation, Journal of Air Transport Management 14(4), 213–220.

Saaty, T. L. (2005). Analytic Hierarchy Process John Wiley Sons, Ltd.

Smith, J. A., Johnson, L. B. & Anderson, R. C. (2018). Integrating ahp-topsis for risk assessment in the oil and gas industry, Journal of Risk Analysis and Management 15(2), 123–140.

Tarokh, M. J. et al. (2017). Risk prioritization of airside operations using a multi-criteria decision-making approach, Journal of Air Transport Management 62, 47–59.

TECHNOLOGY ROADMAP DEVELOPMENT PROCESS APPLIED IN AVIATION TRAINING

Guilherme Siqueira*, Mauro Caetano, Daniel Amaral
University of São Paulo (USP), São Carlos School of Engineering (EESC)
Aeronautics Institute of Technology (ITA)

*** Corresponding author's e-mail address**: guilhermesiqueira@usp.br

PAPER ID: SIT2196

ABSTRACT

Technology Roadmapping - TRM - has been widely utilized as a strategic tool for driving innovation across various industries. However, there are still untapped opportunities in the development of aeronautical products. One such example is flight simulator training devices. Product roadmaps for these types of products need to address concerns such as dependencies on other products, relationships with services, and the type of training offered throughout the innovation development cycle. The primary objective of this paper is to outline a comprehensive technology roadmapping approach that addresses the demands of pilot professional qualification and regulatory requirements, which in turn influences the continuous enhancement of high-end flight simulators. Additionally, this research aims to contribute to advancing aeronautical flight training, particularly by advocating for implementing cost-effective flight simulator training devices equipped with motion cues in flight training centers. Such a development would significantly improve the acquisition of airmanship skills and enhance overall flight safety. Consequently, this study endeavors to explore diverse opportunities for utilizing and refining the conceptual model of TRM within this particular domain.

Keywords: Air transport, Flight simulator, Innovation planning.

ACKNOWLEGDEMENTS

Thank you to Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto for opening the doors of the Aeronautical Technologies Laboratory (AeroTech), which triggered the research presented in this study. Also thanks to the National Council for Scientific and Technological Development (CNPQ).

1. INTRODUCTION

Technology roadmapping (TRM) has found application in the innovation planning of numerous organizations. Its purpose is to analyze and strategically chart the course for businesses, enterprises, products, technologies, and more (Phaal and Kerr, 2022; De Alcantara and Martens, 2019; Phaal et al., 2004). Its success is primarily due to its simplicity, adaptability, and utility (Vinayavekhin et al., 2021). The application of this tool commonly creates a map to guide efforts through paths containing market headings for the innovative technology to be deployed (Phaal, Farrukh, and Mills, 2005).

In cases where these applications require the analysis of downstream and upstream elements related to TRM objectives, they become more intricate and demand additional customization and method adaptation. For instance, in the context of flight simulators, one such element is the need to integrate platform capabilities with flight training planning to align with trainers' programs and, critically, federal agencies' regulations. This serves as a specific characteristic of this innovation segment that significantly influences the roadmapping process. Consequently, grasping how to conduct roadmapping in this scenario becomes crucial for advancing the theoretical basis of TRM and the development of such products.

An influential paper offering a bibliometric literature review and highlighting trending research topics in TRM is Vinayavekhin et al. (2021). The authors curated relevant peer-reviewed papers into ten clusters, with cluster number one focusing on the general concept and scenario. The authors pointed out that "scenario-based roadmapping" is an emerging research area, as the available methods for developing such roadmaps remain limited.

To contribute, it has been taken for the study case a flight simulator developed at the University of São Paulo. The central research issue is showing a roadmap that leads this proof of concept to the market. Also, learning from the gaps of this project, future developments will have a basis on how to evaluate and treat the demands and availabilities of pilot training while roadmapping to orientate the efforts toward innovation.

As a result, the primary aim of this study is to characterize and tailor innovation planning and management tools, especially TRM, to benefit the aviation industry, positioning this paper within the level of organizational roadmapping, as classified by Amer and Daim (2010).

In conclusion, this study presents a comprehensive map that encompasses the necessary technologies, potential products (alongside their aeronautical approval procedures), competitors, and target markets as the outcome.

2. TECHNOLOGY ROADMAPPING AND ROADMAP

The roadmapping practice involves projecting a strategic and flexible action plan that aligns challenges, current and future market trends, products, technology availability, and partnerships with the organization's goals (Carlos, Amaral, and Caetano, 2011). The TRM is a header and effort engager to achieve goals and can be put into practice through workshops involving experts on the target theme being approached. The information and decisions taken during these workshops are then analyzed and projected on a roadmap, depicting possible chronological-oriented technology paths to guide the innovation process (Nazarenko et al., 2022). The roads are strategic: they identify the current and future objectives' technological phases, as well as the situation that the development team considers to be now and what the efforts are to achieve the future technological stage. This is all in terms of resources and capabilities to be developed.

Another characteristic – this one in common between roadmapping and roadmap – is the visual and flexible characters (Vinayavekhin et al., 2021). They ensure tangibility to the method, the capacity to be adjusted, and convey the desired information. The necessity of flexibility and the update of a roadmap is highlighted by Phaal and Kerr (2022), and there are examples in the scientific literature that cover this matter. Kerr, Phaal, and Thams (2019) explain the process of adapting the TRM technique to a certain context and how to benefit from feedback information derived from testing for its improvement: it is the sensitivity analysis

or post-optimality. Phaal and Kerr (2022) assert that those changes should be done periodically, whenever the organization loses focus and/or direction. However, both articles lack a concrete measurable fact or quantitative parameter to state the right time that those revisions must be performed.

2.1. TRM IN THE AERONAUTICS

Examples of TRM applications in aviation can be traced back up to the method's beginning in the early 1960s and are found in organizations such as Boeing, Lockheed Corporation, General Electrics (GE), Rockwell, and United States Air Force (USAF) (Phaal and Kerr, 2020). Nonetheless, TRMs that considers demand and trends specifically to capacitating professional, such as flight training, are scarce in the scientific literature due to the need for identifying technological roads for the intermediate elements in its conception. For instance, new aircraft characteristics related to airport planning, generate a conspicuous complexity for its application if no improvement is made.

The use of TRM in the aerospace industry is studied by Aleina et al. (2018) and Viola, Fusaro, and Vercella (2022), who aimed to develop a roadmap for hypersonic and re-entry vehicles. The sector has several characteristics, such as numerous technical and operational requirements to be matched to enable the use of technology and gain reliability. For this reason, the authors study the insertion of technology readiness level (TRL) in the process of running the TRM and building a roadmap, including ways of quantifying other indicators of maturity and technology availability.

TRL is a scale, ranging from 1 to 9, which portrays the level of maturity of a novel technology considering its possible application and use in a real situation (Mankins, 1995).

Viola, Fusaro, and Vercella (2022) propose an improved Technology RoadmappIng Strategy (TRIS) whose pillars are shown in Figure 1.

The elements in Figure 1 are pillars, or the infrastructure, of the TRM, part of a greater method developed by the authors called TRIS. Briefly, Operational Capabilities (OCs) are the mission statement of the product; Technologies are the know-how to "constitute a Technology

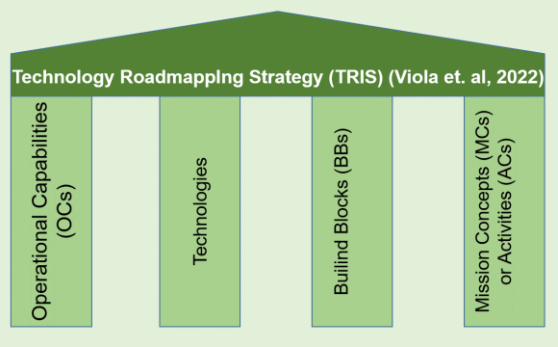


Figure 1 Technology roadmap pillars. Adapted from Viola, Fusaro, and Vercella (2022).

Domain (TD)"; Building Blocks (BBs) are "physical elements" with a set of technologies to achieve OCs and Mission Concepts (MCs) or Activities (ACs) are baseline inputs to increase TRL of technologies or BBs.

The aforementioned citations in the literature review of roadmapping in aerospace propose technological advancements planning but do not demonstrate how to evolve a training plan for the pilots and operators of the spacecraft with its whole pack of innovative technologies onboard. This type of product relies on robust crew training before releasing it, which should be encompassed in the TRM to ensure the success of the product. Also, roadmapping an engineering-to-order (ETO) product is different from a make-to-order (MTO) strategy – the latter a more applicable to the flight simulator project. Therefore, a theoretical gap identified in their study is the lack of a roadmap framework that embraces training on the innovative technology or product that will be launched and compatibility with MTO manufacturing.

Another missing point in common between all major TRM articles is the lack of the requirement of previous preparation by those who will attend a roadmapping session. Caetano and Amaral (2018) propose unraveling the final roadmap into smaller, group-oriented workshops to build the final document and protect companies' secrecy. The article also addresses the practice of planning and preparing for the next roadmap, however, gives few or no procedures on what needs to be researched and known about the topic before attending the meeting with everybody. Having a better-prepared team, though, would enrich discussion as they would come with previous information and think about opportunities and demands.

Last but not least, a reviewed TRM methodology can contribute to the aeronautical sector by helping create a more transparent, scrutinous training program that properly covers novel technologies. An example to illustrate this necessity to align and merge pilot training with innovation planning is the two Boeing B737 MAX 8 accidents, which had the major contributing factor to Boeing's negligence in MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System) Flight Crew Operating Manual (FCOM) reporting for fault scenarios (Jamieson et al., 2022).

3. PILOT TRAINING AND FLIGHT TRAINING DEVICES' ROLES

Flight simulators play a vital role in pilot training. Because initial flight training at aviation schools is expensive (Torğul, Demiralay, and Paksoy, 2022), flight simulation training devices (FSTDs) help cadets build airmanship and be evaluated on the ground at a much lower cost (Wu, 2020). In addition to savings, synthetic flight prevents human injury and hull loss (Grundy et al, 2016). Not limited to civil aviation, FSTD is useful for military-oriented training as well (Källström et al., 2022). Examples of military application areas of FTDS are type conversion, air-to-air refueling, airborne surveillance, carrier landing, landing in poor infrastructure and difficult terrains, air-to-air combat (without expending actual weapons), and team coordination, akin cockpit resources management (CRM) (Vidakovic et al., 2021).
The Federal Aviation Administration (FAA) disposes of flight training under Part 61 and/or 141. According to the Code of Federal Regulations (CFR) Title 14, Chapter I, Subchapter D, Part 61 (14 CFR §61.109), in terms of flight experience only, it is required at least 40 hours of total flight time to earn private pilot license (valid for both rotorcraft category, helicopter and single-engine airplane). FAA permits a credit for use (a maximum of 5 hours of training) of a full flight simulator or flight training device.

In Brazil, the Brazilian Civil Aviation Regulation (RBAC) nº. 61 (2023, Feb 13) determines the following requirements for issuing licenses/ratings if the training is accomplished in a course conducted by a training center certificated under RBAC 141 (CIAC). These flight experience requirements are summarized in Table 1, noting that the level of certification of the aviation training device (ATD) is under IS 141-007C (ANAC, 2023, Feb 24), as shown in Figure 2, and affects the abatement. Table 1, is based on Advanced Aviation Training Devices (AATD).

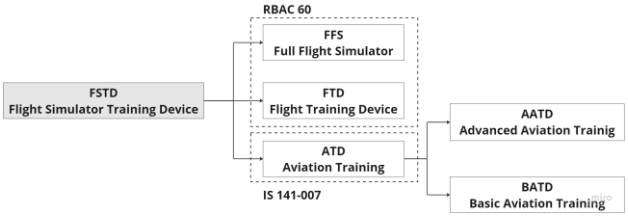


Figure 2 Flight simulator vocabulary and legislation.

Table 1 reiterates the fact that flight training devices play a key role in flight training, especially in reducing costs related to flight time onboard an aircraft. The table also enlightens the reader to see that flight simulators can be used even during the initial flight training (PPL), stressing the effectiveness and liability of this type of device in pilots' qualifications (Vidakovic et al., 2021)).

Table 1 RBAC 61 flight experience requirements (aircraft + FSTD).

Source: ANAC (2023, Feb 13)

	Airplane			***Helicopter***		
	Total hours	***Simulation hours***	***Saving (%)***	***Total hours***	***Simulation hours***	***Saving (%)***
Private Pilot License (PPL)	35	5	14,3	35	5	14,3
Commercial Pilot License (CPL)	150	10	6,67	150	10	6,67
Airline Transport Pilot (ATP) license	1500	30	2	1000	10	1
Instrument Flight Rules (IFR) rating	40	20	50	40	20	50

Furthermore, flight simulators are not only used in aviation schools but also in type-rating courses. For example, according to the Operational Evaluation Report – Airbus A330,

A350 (ANAC, 2022), the A350-900 initial type rating flight training phase requires 9 FFS modules (36 hours), 6 FTD sessions (24 hours), and License Skill Test/Check Ride (4 hours), comprising a flight training that is solely based on the use of a Flight Training Device and a qualified Full Flight Simulator. Flight simulators are also vital when transitioning pilots from airplane to airplane. For example, the same document in Appendix 3 and 5 shows a footprint of A320 to A350 CCQ (cross crew qualification), planning a flight training based on Computer Flight Training (CPT) and FFS Level D.

Because flight simulators count towards flight hours, they should comply with specific regulations. In Brazil, ANAC's RBAC 60 (ANAC, 2020, Mar 20) lays out information about the requirements for qualification and use of training devices for flight simulation. Thus, the device should be qualified and approved by ANAC.

Note that a distinction between qualification and approval shall be made. According to ANACpedia, the word qualification stands for qualifying the device and evaluating it according to the requirements established by RBAC 60 (ANAC, 2020, Mar 20). On the other hand, approving the device is adding it to a course (flight training syllabus) according to the requirements that cover training (e.g.: RBAC 61, RBAC 142, RBAC 121, etc.).

Specifically for full-flight simulators (FFS), the device must meet the standards listed in tables A1, A2, A3, and A4 of the RBAC 60 appendix. Hence, this is the source for embedding a declaration of conformity into the TRM on aviation training and FFS development and it is a part of the conceptual model concluded in section 6 (Results).

Given its extended applicability in flight training, exerting effort to create more realistic cues and scenarios is plausible to deliver a simulation that is even harder to tell apart from reality (Chertopolokhov et al., 2022). For such improvements, there is a distinctive feature to equip an FSTD: the motion platforms, which act as bionic arms to create motion through acceleration perception in all six degrees of freedom (DOF). The most common model is the Steward platform, also known as the hexapod (Vidakovic et al., 2021), which equips the FSTD that will later serve as the study case of our paper. This platform has been a tendency in flight simulator development in recent years (Wei et al., 2022). Figure 3 shows a 3-D view of such equipment assembled.

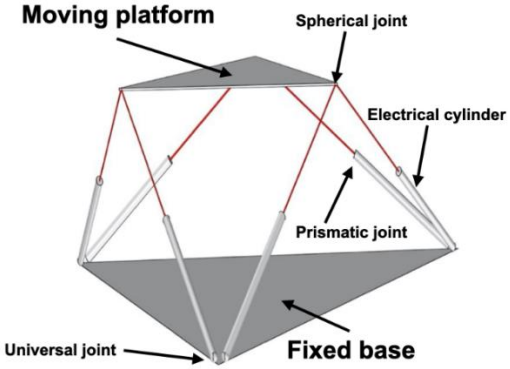


Figure 3 Stewart platform. Source: Adapted from Markou et al. (2021)

4. METHODOLOGY

The main activities related to the deployment of this study are presented in Figure 3 in a way that the main gaps related to the studied theme can be fulfilled throughout the research.

According to Figure 3, theoretical gaps related to TRM have been identified and combined with the training needs of pilots in aviation, aiming to develop a conceptual method. This one has been tested and validated in a case study on the generation of a full-flight simulator.

The criteria for choosing to study a flight simulator featuring a motion platform is considered in pilot training. The case study chosen for testing our model is the prototype developed in the Engineering School of São Carlos at the University of São Paulo. The main characteristics are presented in Table 2.

Table 2: key features of the case study

Prototype name	EB#2
Project beginning	2015
TRL	5
People enrollment	Graduation and post-graduation students
Estimated project cost	R$ 250,000
Partners	Rexroth (Bosh), Material and Manufacturing Engineering Department (SMM), Embraer

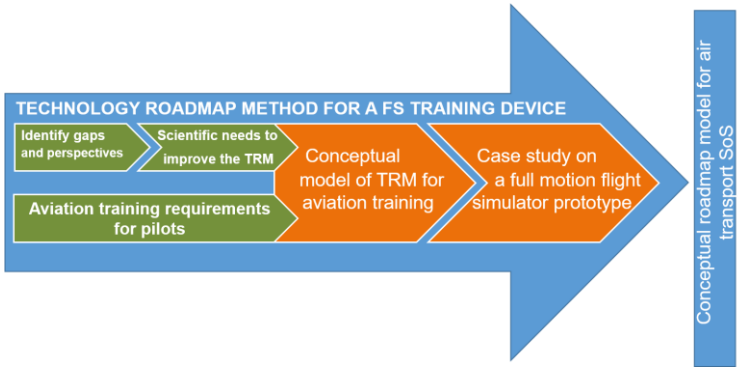


Figure 3 main steps of the research method.

This FSTD simulates Boeing B777-200 (primary flight display (PFD) and navigation display (ND) can be seen in Figure 4). However, in the way its cockpit is designed now, it is impracticable to apply for registration and approval as a B772 FFS because for that it needs an "enclosed full-scale (1:1) replica ((ANAC, 2020, Mar 20), Appendix A, Table A1) of the original cockpit, switches, knobs, throttle quadrants, etc. Hence, because FTDS equipped with motion cues is more effective for ab-intio cadets (Vinayavekhin et al., 2021), the intention of the study case here presented is to set a roadmap to guide the process of transferring this novel know-how to build cheaper hexapods to the market, adapting the simulated aircraft to a single-engine airplane, such as Cessna C152. In other words, the intention is to guide the innovative process that will create the opportunity for FSTD to become the object of an entrepreneur model in the future, but such a level of verification is beyond the scope of this study and is not necessary to validate a TRM model.

Figure 4 shows the FSTD from the outside, displaying the base plate, which connects the cockpit with the platform, as well as the joints and actuators (legs). Complementary, Figure 5 shows the simulator seen from the inside, specifically the pedestal, rudder pedals, sidestick, and the PFD and ND of a B777-200. This perspective restates the argument that this simulator is not capable of being registered as a FFS because it is intended to simulate a Boeing airplane but there is an Airbus' sidestick while there should be a replica of a Boeing's yoke. Hence, a roadmap to integrate this technology with the market needs and regulatory requirements is imperative to innovate.

Figure 4: External view of the prototype.

Figure 5 Interior view of the prototype. Source: Macedo (2021).

5. RESULTS

Aiming to develop a TRM conceptual model that embraces the integration between manufacturer/developer and user, this study presents a roadmap considering partners, resources, technologies, products, and

markets. Then, deploying each layer needs to be accomplished within a credible time horizon.

To accomplish that model, the technology roadmap process suggests sketching the System by diving it into subsystems, as presented in Figure 6. It shows the interaction between subsystems and the user, who gives inputs transferred to mouse commands based on hearing, seeing, and feeling, through the platform motion.

These inputs then return to the user again through hearing (e.g. spooling up the engine or shutting down the engine), seeing (e.g. pitch changes), and acceleration (e.g. yaw, vibration, g force, etc.). The latter is processed on the Flight Simulator Software and sent to the servo actuators, commanded by a Mathlab program and washout filters.

The next step after building the System and SoS is to build the roadmap. Describing the main elements in Figure 7, #I represents some research institutions that can collaborate with solutions as components (#IV) and algorithms (#IX) that, in turn, can be integrated into the motion control system (#VII) technologies, and then, integrated at the product FSTD for its insertion in the different possible market, as aviation schools, incentive flights or even amusement parks.

Additionally, element #II proposes schools as partners to provide industry insight. Because aviation schools have a close relationship with the aviation industry, they can provide valuable insight into industry requirements and technology needs. Including them in the TRM process can help ensure that flight simulators are developed to meet the specific needs of the aviation sector. Later, these schools will have access to cutting-edge technology and provide students with access to state-of-the-art flight simulators that accurately reflect the technology used in real-world aviation operations.

Similarly, box #V comprises the technical resources indispensable for the technologies listed above. TRM can be used to identify the technology requirements of the aviation industry and ensure that flight simulators are designed to meet those needs. This can lead to a more realistic and effective training experience for users. Finally, when comprised, all technologies lead to the proof of concept that the University already has, plus market and budget headings that will guide the innovation process and the training program, which is the bridge between the new product (prototype) and the market.

It is mandatory to identify the regulations. Pilot training needs to comply with a set of regulations of pilot training, such as Part 61 and Part 141 of the CFR and Part FCL (EASA, 2016), and, particularly in this case analyzed, the RBAC 141, 142 and IS 141-007A (ANAC Feb, 2021; ANAC Feb 13, 2023; ANAC Feb 24, 2023). The same extensive pack of requirements lays over a flight simulator registration. Figure 7 shows five stars displayed along the transition arrows to serve as certification gates created during the roadmapping workshop phase to check these requirements. Later, agencies (box #X) will validate the technology and certify the product for aeronautical purpose use.

One aspect that needs to happen throughout the whole phase of pre-development and, especially, the development of the product is documenting all necessary steps, tests, and actions taken. USP EB#2 simulator project lacks in this aspect, which makes it much more difficult to assess its continuous improvements and evolution to potential investors.

In terms of quantitatively analyzing the roadmap efficacy and accuracy, the time horizon is a promising element to be this indicator, assuming project management techniques. The Program Evaluation and Review Technique (PERT) is a useful project management technique because it helps to plan and control a project, especially when there is uncertainty in the estimated completion times of the activities (Farida and Anenda, 2022). PERT is more adequate for uncertain scenarios, or when there is little knowledge of how to estimate durations because it uses stochastic components to obtain estimated times: mean and variance.

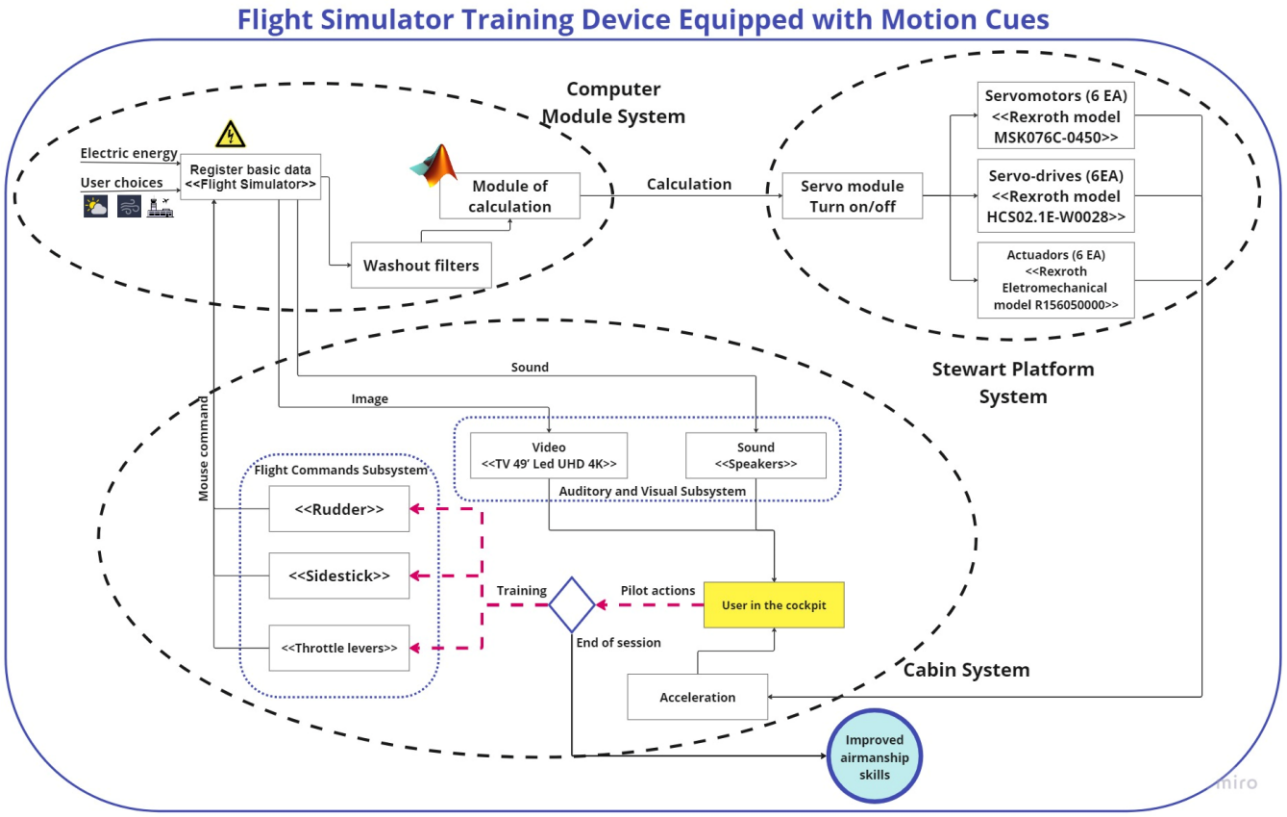


Figure 6 FSTD equipped with motion cues system and SoS.

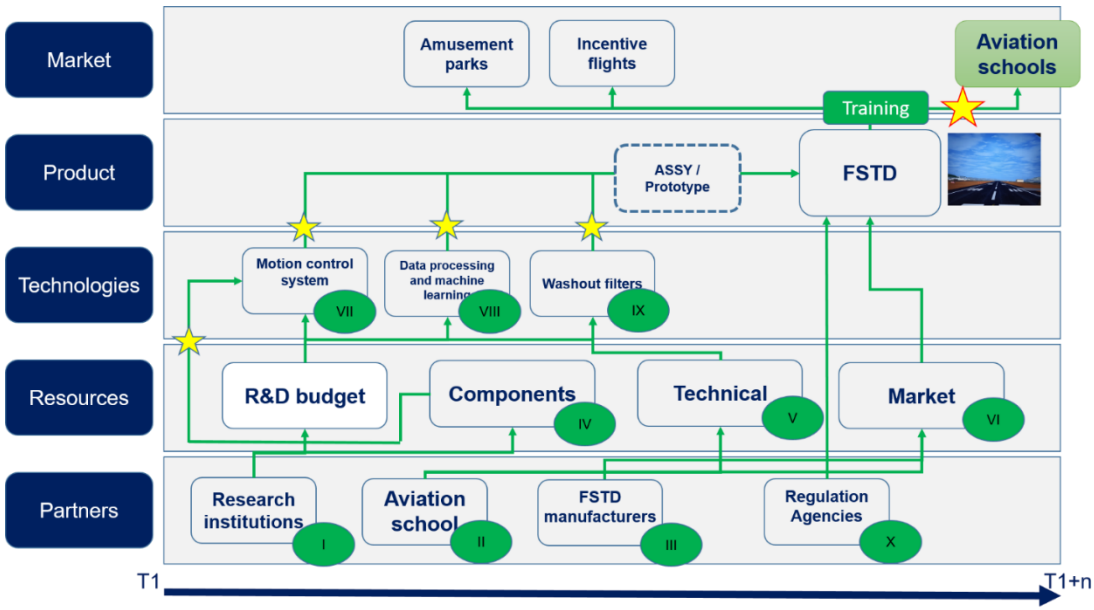


Figure 7 TRM on aviation conceptual model.

6. CONCLUSIONS

TRM can be employed to identify the technological requirements of the aviation industry and ensure that flight simulators are designed to meet these needs. Engaging with industry stakeholders as part of the TRM process can aid developers in comprehending the technology needs and demands of the aviation sector. Consequently, this can result in a more realistic and effective training experience for users.

Breaking down new product projects using the TRM methodology offers the advantage of allowing developers to gather more information about the market and regulatory practices of agencies, thereby mitigating unforeseen noncompliance with

these regulations. This elucidation typically occurs in a workshop where the entire team participates and contributes new ideas and foresight.

The methodology presented in this article, referred to as the "roadmap development process," is focused on outlining the system under study through the lens of systems engineering. It has been tested with the EESC-USP's EB#2 flight simulator, demonstrating its applicability and highlighting crucial steps, particularly in aviation, such as maintaining documentation throughout the entire process and establishing gates for regulatory compliance.

Future research opportunities in this field include assessing the extent to which a full-motion platform enhances flight training and comparing it with its associated costs. The objective is to validate or not a new business case emerged when performing roadmapping.

7. REFERENCES

Aleina, S. C; Viola, N.; Fusaro, R.; Longo, J.; Saccoccia, G. (2018). Basis for a methodology for roadmaps generation for hypersonic and re-entry space transportation systems. Technological Forecasting and Social Change. Vol. 128. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.004

Amer, M.; Daim, T. U. (2010). Application of technology roadmaps for the renewable energy sector. Technological Forecasting and Social Change. Vol. 77, 8, 1355-1370. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2010.05.002

ANAC. (2020, Mar 20). Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil 60: Requisitos para qualificação e uso de dispositivos de treinamento para simulação de voo.. Retrieved Jul 01, 2022, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-60

ANAC. (2021, Feb 12). Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil 142: Certificação e Requisitos Operacionais: Centros de treinamento de aviação civil. Retrieved May 26, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-142

ANAC. (2023, Feb 13). Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil 61: Licenças, habilitações e certificados para pilotos. Retrieved May 26, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-61

ANAC. (2023, Jan 01). Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil 141: Certificação e requisitos operacionais: Centros de Instrução de Aviação Civil. Retrieved May 26, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-141

ANAC. (2023, Feb 24). Agência Nacional de Aviação Civil. Instrução Suplementar 141-007C: Programas de Instrução e Manual de Instruções e Procedimentos. Retrieved May 26, 2023, from https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-141-007c

Caetano, M.; Amaral, D. C. (2011). Roadmapping for technology push and partnership: A contribution for open innovation environments. Technovation, 31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.technovation.2011.01.005

Carlos, R.; Amaral, D. C.; Caetano, M. (2018). Framework for continuous agile technology roadmap updating. Innovation and management review. Vol. 15, 3. DOI: https://doi.org/10.1108/INMR-05-2018-0030

De Alcantara, D. P; Martens, M. L. (2019). Technology Roadmapping (TRM): a systematic review of the literature focusing on models. Technological Forecasting and Social Change, 138. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.08.014

EASA. (2016, Jun). Part-FCL. Retrieved Sep 06, 2023, from https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Part-FCL.pdf

Farida, Y.; Anenda, L. P. (2022). Network Planning Analysis on Road Construction Projects by CV. X Using Evaluation Review Technique (PERT) –Critical Path Method (CPM) and Crashing Method. International Journal of Integrated Engineering. 14 (12). DOI: https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.04.029

Grundy, J. G.; Nazar, S.; O'Malley, S.; Mohrenshildt, M. V., Shedden, J. M. (2016). The Effectiveness of Simulator Motion in the Transfer of Performance on a Tracking Task Is Influenced by Vision and Motion Disturbance Cues. Human Factors, 58(4). DOI: https://doi.org/10.1177/0018720816639776

Jamieson, G. A.; Skraaning, G.; Joe, J. (2022). The B737 MAX 8 Accidents as Operational Experiences with Automation Transparency. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 52, 4. DOI: https://doi.org/10.1109/THMS.2022.3164774

Källström, J.; Granlund, R.; Heintz, F. (2022). Design of simulation-based pilot training systems using machine learning agents. The Aeronautical Journal, 126(1300). DOI: https://doi.org/10.1017/aer.2022.8

Kerr, C.; Phaal, R.; Thams, K. (2019) Customizing and deploying roadmapping in an organizational setting: The LEGO Group experience. Journal of Engineering and Technology Management, Vol. 52. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2017.10.003

Macedo, J. P. C. A. de. (2021) A comparison between qualitative pilots' opinion and quantitative flight data on potential loss of control in flight conditions. Master's Dissertation. Retrieved on Oct 10, 2022, from: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18161/tde-08022022-160017/publico/DissertMacedoJoaoPauloCAdeCorrected.pdf.

Mankins, J. C. (1995). Technology readiness levels - A White Paper. Available at: https://rb.gy/wuos9. Accessed: 05 Sep. 2023.

Markou, A. A.; Elmas, S.; Filz, G. H. (2021). Revisiting Stewart–Gough platform applications: A kinematic pavilion. Engineering Structures, 249. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113304

Nazarenko, A.; Vishnevskiy, K.; Meissner, D.; Daim, T. (2022). Applying digital technologies in technology roadmapping to overcome individual biased assessments. Technovation. Vol. 110. DOI: https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102364

Phaal, R.; Farrukh, C. J. P.; Probert, D. R. (2004). Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. Technological Forecast and Social Change. Vol. 71. DOI: https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6

Phaal, R.; Kerr, C. (2020). Technology roadmapping: Industrial roots, forgotten history and unknown origins. Technological Forecast and Social Change. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119967

Phaal, R.; Kerr, C. (2022) Roadmapping and Roadmaps: definition and underpinning concepts. IEEE Transactions on Engineering Management. 69, 1. DOI: https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3096012

Song, Y.; Tian, W.; Tian, Y.; Liu, X. (2022). Calibration of a Stewart platform by designing a robust joint compensator with artificial neural networks. Precision Engineering, Vol. 77. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.07.001

Torğul, B.; Demiralay, E.; Paksoy, T. (2022). Training aircraft selection for department of flight training in fuzzy environment. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 5(1). DOI: https://doi.org/10.31181/dmame0311022022t

Vidakovic, J.; Lazarevic, M.; Kvrgic, V. et al. (2021). Flight Simulation Training Devices: Application, Classification, and Research. Int. J. Aeronaut. Space Sci. 22. DOI: https://doi.org/10.1007/s42405-021-00358-y

Vinayavekhin, S.; Phaal, R.; Thanamaitreejit, T.; Asatani, K. (2021). Emerging trends in roadmapping research: A bibliometrics literature review. Technology Analysis & Strategic Management. DOI: https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1979210

Viola, N.; Fusaro, R.; Vercella, V. (2022). Technology roadmapping methodology for future hypersonic transportation systems. Acta Astronautica, Vol. 195. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.03.038

Wu, L. (2020). Development of an affordable and high-fidelity flight simulation training device. Journal of Aeronautics and Aviation. Vol. 52 (3). DOI: https://doi.org/10.6125/JoAAA.202009_52(3).08

AIRPORT INFRASTRUCTURE

This technical section is the one with more publication in the XX SITRAER, with 20 papers in total, most of them with women as authors and primarily from the Brazilian Southeast region. In that section, there are publications with authors from private companies, universities, and government agencies. The technical section promoted the discussion related to Privatization, Planing and Investments, Construction and Management and Operations of airports.

his page intentionally left blank.

A NDEA MODEL TO EVALUATE AIRPORT EFFICIENCY TO GENERATE NON-AVIATION REVENUES: A CASE STUDY OF GUARULHOS INTERNATIONAL AIRPORT

Marcus Vinicius do Nascimento, Giovanna Miceli Ronzani Borille
Aeronautics Institute of Technology, Division of Civil Engineering

*** Corresponding author e-mail address**: marcus.nascimento@ga.ita.br

PAPER ID: SIT2205

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the airport performance in generating financial gains provided by non-aviation revenues. Financial results have been highlighted in the structuring of an airport as a business, considering that the airport administrator is looking for alternatives to maximize its revenues and to improve the commercial function of the airport. Also, this theme is aligned to the fact that non-aviation revenues have a prominent place in the financial health of modern airports. The identified technical-scientific challenge is to estimate the airport efficiency using a 2-Step Network Data Envelopment Analysis model. As a result, the airport manager has a better understanding of the airport performance which allows faster and more consistent decisions. An example of these decisions is the readjustment of the layout of a terminal to promote consumption since the literature indicates a strong relationship between passenger experience at the terminal and the willingness-to-spend. To test the proposed method in this paper the model was be applied considering the Guarulhos International Airport. The model results indicated that maximum efficiency was achieved during periods when the airport had a higher proportion of international passenger movements. As an example, we can mention the quarters when Brazil hosted the FIFA World Cup in 2014.

Keywords: Non-aviation revenues, Airport, Efficiency, Performance, Privatization.

2. INTRODUCTION

Zenglein and Müller (2007) defend the hypothesis that the performance of an airport should be associated with the ability of its manager to leverage financial gains in each provided service. Thus, airport operators were forced to diversify its revenues sources (Figure 1). Currently, assessing an airport for its efficiency to generate revenues gains implies analyzing both aviation and non-aviation revenues. Aviation revenues is a result of every aeronautical operation such as airplane movement, cargo storage, and luggage handling. In contrast, non-aviation revenues are classified as all those coming from elements non-related to the end operation of an airport, such as parking lots, shops, restaurants, duty-free, and stores in general.

Figure 1 - Types of revenues. Source: IATA, 2019 and GRAHAM, 2008. Prepared by the author.

A notorious fact is that the taxation of aeronautical operations is also under less regulation than it was observed in the past. As consequence, the sector faces an increasing market power of low-cost carriers which correlates to the decreasing of aviation revenues (Yokomi, Wheat and Mizutani, 2017; Fuerst and Gross, 2018). Thereby, non-aviation revenues are positioning itself as potential sources to promote the sustainable financial development of airports (Torres et al., 2005; Wu and Chen, 2019).

The main objective of this paper is to evaluate the airport efficiency to generate non-aviation revenues considering a cost-revenue production cycle. Based on airport main infrastructure, traffic data and passenger experience at terminals, this paper intends to fill a literature gap of a method that indicates efficiency financial targets to the airport management body.

After this introduction, the paper is divided as follows:

- Literature Review
- NDEA Model Application
- Results
- Final Considerations

3. LITERATURE REVIEW

In this section we investigate academic and technical contribution published in high impact journals that brings fundamentals concepts for the development of this thesis. The relevant issues can be classified according to the following elements: (i) passenger satisfaction, (ii) privatization and airport financial performance, (iii) challenges on aviation revenues generation (iv) airport efficiency.

Before addressing these four elements, Table 1 reviews recent studies that demonstrates factors that can impact non-aviation revenues generation.

Table 1 - Overview of studies on airport financial performance

Authors	Methodology	Collected Data	Main Conclusions
Fasone, Kofler and Scuderi (2016)	Econometrics	60 observations (15 airports during the years of 2009 to 2012)	- Increasing number of Low-Cost-Companies has a negative impact on passenger expenditures - More passenger in the terminal discourages the willingness to spend - Total m² of commercial areas is not significant to explain the levels of non-aviation revenues
Yokomi, Wheat and Mizutani (2017)	Log-Log Regression	238 observations (26 airports during the years 1999 to 2008)	- Increasing number of Low-Cost-Companies has a negative impact on passenger expenditures - Low-Cost-Companies' passengers spend less time in terminal than non-Low-Cost-Companies
Fuerst and Gross (2018)	Log-Log Regression	75 Airports	- Share of international passengers and the size of the commercial area have significant positive effect on airport commercial performance
Nascimento et al. (2022)	Linear Regression	Quarter time series data from 2013 to 2019	- Higher satisfaction with products price has negative impact on nonaviation revenues. - New international terminal operation generates quarterly growth of 56.6 million R$ in non-aviation revenues. - International passengers have a positive impact on non-aviation revenues generation

As seen on Table 1, some papers indicate that the operation of non LCC has a positive influence on passengers' expenditures when comparing with the airports with more LCC (Fasone, Kofler and Scuderi, 2016, and Yokomi, Wheat and Mizutani, 2017).

Also, some studies indicated that the share of international passengers also contributes to non-aviation revenues generation (Fuerst and Gross, 2018, and Nascimento et al., 2022).

These results can be associated with the fact that LCC passengers and domestic passengers spend less time in the terminal than non LCC passenger and international passengers. Castillo-Manzano et al (2010) observed a positive correlation between the time spend at terminals and the propension to consume.

3.1. PASSENGER SATISFACTION

Airport service quality is not an issue that has just started to be addressed. In the 1970s, published papers like Brink and Madison (1975) started the discussion about the level of service based on how much time a passenger spends at a terminal. At the time, the authors discussed that for both travelers who seeks to minimize the processing time on the landside and travelers which travel experiences are enhanced by time spent at the terminal, the experience perception is affected by architectural objective attributes such as open space, ceiling heights, lighting, and terminal design features. Although, all these attributes are subjectively evaluated by passengers. Also, the paper addresses the role of the cost of using services provided at the terminal. These services include parking lot, restaurants, commercial facilities etc. The authors conclude that all these services may affect the overall impression of level of service.

Several new studies aiming to understand the relations between how well and how much time a passenger stays at a terminal and the effects of the dwell time on non-aviation revenues. Castillo-Manzano (2010), for example, suggests that the expenditure levels increase as the waiting time increases.

In these cases, it is essential to know how the passenger perceives the terminal environment (e.g., signaling quality, comfortable seats etc.) and how these

perceptions stimulate the willingness-to-spend. It is impossible to dissociate the concept of passenger experience to service quality, and new research indicates some terminal attributes which are positively evaluated by passengers.

Kiliç and Çadirci (2020) identified leisure activities, ambient conditions, and terminal facilities as three of the top 10 attributes that have positive impact on passenger experience. Also, the study found out that operational readiness is another way to promote a quality perception at terminal.

Nascimento et al. (2022) presented that the positive passenger evaluation of products price on commercial establishments has a negative impact on nonaviation revenues. The authors conclude that a better passenger satisfaction level with price should indicate lower prices for groceries and products. At the same time, it is possible that the price reduction is not accompanied by a growth in sales volume. This result demonstrates a possibility that the commercial environment inside the airport terminal has a different concept of supply and demand balance that should be investigated in future works.

3.2. PRIVATIZATION AND AIRPORT FINANCIAL PERFORMANCE

Airports are fundamental part of the air transport value chain since they correspond to the system's basic operational infrastructure. The competitive market and the novel business perspective for airports put a lot more pressure for profit margins gains (Merkert and Assaf, 2015; Cruz and Sarmento, 2017).

Thus, due to the increasing necessity to relieve the public sector of the financial burden of providing large investments, airport's privatization become a worldwide practice (Horonjeff et al. 2010). In these scenario, Cruz (2017) considers that airports are structures susceptible to the financial claw back strategy of governments, particularly those that are recovering from global and financial crisis.

With the privatization trend, the new airport managers have been facing a challenging scenario to be more financially self-sufficient and to improve the airport performance as an oriented business structure (Fasone et al., 2014; Fragoudaki and Giokas, 2020). This challenging scenario fosters the development of novel strategies to promote airport's profitability and financial performance such as the role of commercial infrastructures at passenger terminals (Zuidberg, 2017).

3.3. CHALLENGES ON NON-AVIATION REVENUES GENERATION

As seen on Kazda and Caves (2015) many airport administrations obtain higher revenues from non-aviation services than from aviation services. In Brazil, for example, the airports privatization has started in 2012. Since then, the concessionaires financial report indicates an average growth of almost 65% in the participation of non-aviation revenues on airport revenues distribution after the first year of privatization.

Since commercial areas become the main sources of non-aviation revenues, IATA (2014) recommends that passengers should have a set of high-quality services available while waiting at the terminal. In this case, it is essential that the commercial section of the terminal become an integrated part of the design planning. For the design of these spaces, IATA (2014) recommends a proportion between the area used by each commercial facility type and the whole terminal area (Table 2**Error! Reference source not found.**).

Table 2 - Estimated area by commercial facility types

Commercial Facility	Percent of whole terminal area
Duty-free	5% - 15%
Personal or business services	5% - 10%
Convenience retail	10% - 20%
Specialty retail	25% - 40%
Food and Beverage	40% - 60%

(Source: IATA, 2014)

3.4. AIRPORT EFFICIENCY

A wide variety of studies uses data envelopment analysis (DEA) to evidenciate the individual performance of airports (Graham et al., 2005; Lai et al., 2012; Merkert et al., 2012; Vogel and Graham, 2013, lo Storto, 2018, Fragoudaki and Giokas, 2020).

Although, the main airport performance studies rely mainly on operational efficiency analysis and there is a literature gap to evaluate financial performance, including airport´s performance considering non-aviation revenues generation (Psaraki-Kalouptsidi and Kalakou, 2011; Fernandes and Pacheco 2018; Olariaga and Moreno, 2019).

Lo Storto (2018) is one interesting publication that proposes a relationship between operational and revenues generation using a NDEA model. Since traditional DEA models was developed to evaluate the efficiency of a DMU as a black box, NDEA models consider the internal structure of the DMU's and become a common application in problems that requires a sequence of production stages. Lo Storto (2018) paper provides an insight of airport cost-revenue production cycle that allows a comprehensive view of how different types of resources (inputs) are sequentially utilized and transformed to produce necessary outputs in an airport. In this case, the author specified two stages for airports cost-revenue cycle, creating a relationship between operational costs with passenger and aircraft movement, and airport revenues (both, aviation and non-aviation revenues).

4. NDEA MODEL APPLICATION

Based on the literature presented on Item 3 (Maghbouli et al., 2014, Lo Storto, 2018 and Nascimento et. al, 2022), Table 3 indicates suggested variables to compose the NDEA model. Also, Table 3 presents the function of each variable on the NDEA model.

Table 3 - NDEA variable's description

Variable	Measurement	Explanation	Variable function Stage 1	Variable function Stage 2
Operational Costs	R$MM	Represents the main necessary operational costs to maintain the airport operation	Input	-
Personal Costs	R$MM	Represents the main necessary personal costs to maintain the airport operation	Input	-
Quality of commercial establishments	Number	Passenger satisfaction regarding the quality of commercial establishments	Output	Input
Quality of food & beverages establishments	Number	Passenger satisfaction regarding the quality of food & beverages establishments	Output	Input
Price of commercial establishments	Number	Passenger satisfaction regarding the price of commercial establishments	Output	Input
Price of food & beverages establishments	Number	Price of food & beverages establishments	Output	Input
Non-Aviation revenues	Value of non-aviation revenues x1000000	Non-Aviation revenue during a specific period	-	Output

The NDEA model can be mathematically expressed by the sequence of Equations (1). Note that the proposed mathematical formulation is a 2-Stage NDEA model that is a standard mathematical structure in the literature (Chen et al., 2009, Kao, 2009 and Meza et al., 2018).

$$E_0 = \max \sum_{r=1}^{s} u_r . y_{r0} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{m} v_i . x_{i0} = 1$$

$$\sum_{d=1}^{q} w_d . z_{dj} - \sum_{i=1}^{m} v_i . x_{ij} \leq 0, \; j = 1,2,\ldots,n.$$

$$\sum_{r=1}^{s} u_r . y_{rj} - \sum_{d=1}^{q} w_d . z_{dj} \leq 0, \; j = 1,2,\ldots,n.$$

$$u_r, v_i, w_d \geq \varepsilon, \; i = 1,2,\ldots,m; \; r = 1,2,\ldots,s; \; d = 1,2,\ldots,D.$$

Where:

ur = non-negative weights determined for the outputs of the second stage

vi = non-negative weights determined for the inputs of the first stage

wd = non-negative weights determined for the outputs of the first stage (that become the weights for the inputs of the second stage)

yr0 = outputs values of the analyzed DMU

xi0 = inputs values of the analyzed DMU

xij = inputs values of the first stage for all DMUs

zdj = outputs values of the first stage for all DMUs (that become the input for the second stage)

yrj = outputs values of the second stage for all DMUs

4.1. GUARULHOS INTERNATIONAL AIRPORT AND DATA COLLECTION

Guarulhos International Airport is the main Brazilian airport in passenger and airplanes movement. Considering the year 2019, it reported a movement of 43 million passengers.

In comparison to the whole Brazilian airport infrastructure during the years 2013 to 2018, the airport represents itself around 35% of the country's passenger movement. These results place Guarulhos International Airport as the second busiest airport in Latin America. Mexico City International Airport is the largest airport in the Latin American region as measured by passengers handled and by aircraft movements (Nascimento, 2022).

All data for the Guarulhos International Airport has been collected since 2013 until 2020. These data were acquired through the airport financial reports. Table 4 presents the collected data. The Guarulhos International Airport administration body deliver a quarter report about the airport performance. The Service_Costs and Personal_Costs columns represents the respective costs in Brazilian Reais (BRL) and need to be multiplied by 1000. Thus, the observation for the first quarter of 2013 indicates that the airport had 182.89 millions of Brazilian Reais of total cost to provide its services (both aviation and non-aviation services). Columns QUAL_EST, QUAL_FB, PRICE_EST and PRICE_FB indicate the average passenger satisfaction regarding the commercial and food & beverage services. In this case, 1 is equal to total dissatisfaction and 5 is equal to total satisfaction. Finally, the column NA_Revenue represents the amount of non-aviation revenues in the specific quarter. This value also needs to be multiplied by 1000.

Table 4 – Collected data

Obs	Airport	YEAR	QUARTER	Service_Costs	Personal_Costs	N_EST	PAX_DOM	PAX_INT	NA_REVENUE
1	**GRU**	2013	1	182898	42299	102	5379.0	3081.0	128.0
2	**GRU**	2013	2	235652	51600	102	5528.0	2938.0	157.4
3	**GRU**	2013	3	225039	46941	144	6027.0	3289.0	154.3
4	**GRU**	2013	4	217892	47880	144	6504.0	3216.0	186.0
5	**GRU**	2014	1	233932	50953	144	6505.0	3212.0	176.1
6	**GRU**	2014	2	265820	33529	144	6095.0	3246.0	241.6
7	**GRU**	2014	3	316512	19456	235	6493.0	3653.0	251.9
8	**GRU**	2014	4	278571	75789	227	6863.0	3470.0	245.6
9	**GRU**	2015	1	301482	40048	223	6491.0	3409.0	240.5
10	**GRU**	2015	2	499752	42460	234	5956.0	3231.0	239.6
11	**GRU**	2015	3	323297	31973	231	6488.0	3594.0	229.4
12	**GRU**	2015	4	119831	56564	238	6430.0	3386.0	228.6
13	**GRU**	2016	1	318175	38603	230	6200.8	3394.5	221.6
14	**GRU**	2016	2	317679	39440	223	5308.0	3239.0	227.4
15	**GRU**	2016	3	326850	42105	229	5841.0	3506.0	234.7
16	**GRU**	2016	4	321442	41084	241	5781.4	3357.2	227.6
17	**GRU**	2017	1	317664	37805	260	5820.7	3454.5	213.4
18	**GRU**	2017	2	314055	34049	259	5372.9	3297.2	223.5
19	**GRU**	2017	3	323063	34624	268	6193.6	3678.9	241.4
20	**GRU**	2017	4	318198	35202	292	6398.8	3549.3	242.5
21	**GRU**	2018	1	335237	35488	301	6485.1	3728.0	232.2
22	**GRU**	2018	2	332804	27480	264	6456.7	3524.7	243.9
23	**GRU**	2018	3	334033	30394	313	7106.6	3899.9	257.2
24	**GRU**	2018	4	338481	41176	323	7294.0	3735.3	257.0
25	**GRU**	2019	1	353173	25636	333	7105.8	3823.9	259.9
26	**GRU**	2019	2	353377	25589	310	6085.8	3593.4	258.4
27	**GRU**	2019	3	366730	32249	310	7198.6	3805.8	271.2
28	**GRU**	2019	4	366586	39826	350	7848.2	3540.5	275.0

4.2. NDEA MODEL

The NDEA application for the Guarulhos International Airport resulted in the following efficiency levels (Table 5).

Table 5 – NDEA results

YEAR	QUARTER	Global_Efficiency(%)
2013	1	0.47
2013	2	0.45
2013	3	0.42
2013	4	0.52
2014	1	0.44
2014	2	0.83
2014	3	1.00
2014	4	0.54
2015	1	0.66
2015	2	0.51
2015	3	0.72
2015	4	0.81
2016	1	0.65
2016	2	0.66
2016	3	0.65
2016	4	0.63
2017	1	0.63
2017	2	0.68
2017	3	0.73
2017	4	0.74
2018	1	0.68
2018	2	0.79
2018	3	0.80
2018	4	0.71
2019	1	0.83
2019	2	0.83
2019	3	0.78
2019	4	0.73

The NDEA model was implemented through the DJL package in the R language. The DJL is a complete library that implements various decision support tools related to the Econometrics and Thecnometrics (CRAN, 2023).

The efficiency results presented on Table 5 indicate that the Guarulhos International Airport reached the highest efficiency level in the third quarter of 2014. Coincidently, this is the quarter that Brazil held the FIFA 2014 World Cup.

In this period, the country received a significant number of international passengers. The efficiency results can be in accordance with recent studies which indicate that international passengers are more likely to spend at the commercial areas of airport terminals (Castillo-Manzano, Valpuesta, and Braza, 2018; Fuerst and Gross, 2018).

Also, since the first quarter of 2014 the airport started a new terminal operation. Known as Terminal 3, this new infrastructure is totally dedicated to international flights.

5. FINAL CONSIDERATIONS

This article presented an NDEA modeling to assess the efficiency of an airport in generating non-aviation revenues. The proposed model is based on a 2-step production cycle in which operating costs impact passenger perception of quality, which in turn affects the airport's ability to generate revenues.

As an application, the context of Guarulhos International Airport was chosen, the largest airport in terms of aircraft and passenger movement in Brazil and the second largest in Latin America. The data was compiled in conjunction with the airport administration from their quarterly reports to shareholders. Data on costs, revenues, and movement were obtained. In addition to the data collected from the airport, passenger perception of quality was obtained through the Quality Survey developed by ANAC.

The application results indicated that Guarulhos International Airport achieved a higher efficiency index during periods of specific passenger movement, namely the 2014 FIFA World Cup in Brazil. Interestingly, this was a period of high volume of international passengers. This result was aligned with specific literature pointing to a trend of increased consumption from passengers on long-distance flights, especially continental ones.

As future work, the application of Machine Learning tools is suggested to

observe other variables that may affect airport efficiency, including seasonality and specific passenger profiles (e.g. gender, age, and travel frequency).

It is also understood that this work is limited to its application context. Results may vary depending on the chosen airport's context and specific events to which the airport's location is subject.

6. REFERENCES

Castillo-Manzano, J. I.; Valpuesta, L. L.; Braza, A. S. (2018). When the mall is in the airport: Measuring the effect of the airport mall on passengers' consumer behavior. Journal of Air Transport Management 72, p.32–38.

CRAN. (2023). DJL: Distance Measure Based Judgement and Learning. *https://cran.r-project.org/web/packages/DJL/index.html*

Fasone, V.; Kofler, L., & Scuderi, R. (2016). Business performance of airports: non-aviation revenues and their determinants. Journal of Air Transport Management, 53, 35-45.

Fuerst, F., Gross, S. (2018). The commercial performance of global airports. Transport Policy, v.61, 123–131.

Graham, A. (2009). Managing Airports e An International Perspective, third ed. Oxford, Burlington.

IATA (2019). Airport Development Reference Manual (ADRM). Available at: https://www.iata.org/contentassets/78c9e92aacdf416db90326c7a77ea7ad/adrm11-toc-en-20190215.pdf.

lo Storto, C. (2018). The analysis of the cost-revenue production cycle efficiency of the Italian airports: A NSBM DEA approach. *Journal of Air Transport Management, 72*, 77-85.

Nascimento, M. V.; Borille, G. M. R.; Bandeira, M. C. G. S. P.; Da Silva, L. M. (2022). An evaluation of non-aviation revenues based on passenger satisfaction and quantity of commercial establishments at terminals: A case study of a Brazilian airport. Case Studies On Transport Policy, v. 10, p. 1457-1461.

Torres, E., Domínguez, J. S., Valdés, L., Aza, R. (2005). Passenger waiting time in an airport and expenditure carried out in the commercial area. Journal of Air Transport Management, 11, 363–367.

Wu, C.L., & Chen, Y. (2019). Effects of passenger characteristics and terminal layout on airport retail revenue: an agent-based simulation approach. Transportation Planning and Technology, 1–20.

Yokomi, M., Wheat, P., Mizutani, J. (2017). Journal of Air Transport Management, v.64, 77–85.

Zenglein, M. J., Müller, J. (2007). Non-aviation revenue in the airport business-Evaluating performance measurement for a changing value proposition. German Airport Performance Projekt. Berlin: Berlin School of Economics.

ANÁLISE DO SETOR AEROPORTUÁRIO NA PERSPECTIVA DO PLANEJAMENTO LOGÍSTICO: UM ESTUDO DE CASO DA PLATAFORMA CEARÁ 2050

Fabiano Rocha*
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE
Giovanna Miceli Ronzani Borille**
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA
* fabiano.rocha@ifce.edu.br, ** ronzani@ita.br

PAPER ID: 2253

RESUMO

Currently, airports, in their multimodal connection potential, can boost the ability of companies and industries to compete at a high level in various types of markets. Connectivity is widely demanded nowadays, whether in social environments (urban and rural) or in business environments. In view of this, the airport sector becomes an indispensable strategic element within long-term urban logistics planning in various parts of the world. The aim of this study is to analyze the airport sector from the perspective of urban logistics planning. It was decided to carry out a case study on the Ceara2050 Platform, the largest socio-economic development project in the state of Ceará that aims to plan and execute development actions throughout the state for the next 30 years. Bibliographical research was carried out to substantiate the theme and appropriate the specific case for analysis. The documental analysis method was then used, followed by the case study. There was a significant importance of the airport sector for the achievement of proposed goals (mainly linked to economic indicators) within this long-term urban planning platform. The platform indicated strategic priorities, including: (i) taking advantage of Ceará's geographical position for the construction of an air hub; (ii) development of the state's air and airport sector and (iii) opportunities for the state's tourism sector, driven by the airport sector. It was concluded that this information indicates a clear tendency for the state of Ceará and other similar regions around the world to prioritize the development of robust projects in the airport sector as a priority in the long-term urban logistics planning (for example: airport-city and airport-industry). Thus, the airport sector must be a priority in long-term urban logistics planning, given its connectivity potential to meet existing demands in these environments.

Palavras-chave: Setor aeroportuário, Planejamento logístico, Ceara2050, Aeroportos.

1. INTRODUÇÃO

O cenário socioeconômico moderno das cidades, em suas várias dimensões, apresenta o setor aeroportuário como um indispensável elemento dentro do planejamento logístico urbano (Matera, 2012). Os aeroportos surgiram como o necessário *Gateway* de transição das aeronaves em sua função básica de pouso e decolagem, bem como a prestação de serviços relacionados a pessoas e cargas (ANAC, 2019).

Atualmente os aeroportos, em sua capacidade de conexão multimodal, podem impulsionar a capacidade de competição em alto nível de empresas e indústrias em vários tipos de mercados. Eles influenciam todo o território onde estão inseridos através do específico fortalecimento do ambiente de rede proporcionada pelos aeroportos e demais modais a ele associados (Maciel, Santos Junior & Proença, 2016).

Os dados do início do século XXI, apresentados na Figura 1, mostram que o mercado aéreo brasileiro, no que diz respeito à escolha por viajar de avião, teve aumento da demanda por voos, independentemente das grandes crises mundiais enfrentadas (TRANSPORTE, 2015).

Figura 1 Evolução da escolha por viajar de avião por habitante (Valores em viagem/habitante ano). Fonte: TRANSPORTE, 2015.

As medidas do Governo Federal atuando através de políticas fiscais com o intuito de mitigar os efeitos do ciclo econômico negativo, são conhecidas como medidas contracíclicas. Tais medidas foram adotadas no período da crise de 2008, e são um dos motivos do mercado aéreo brasileiro sobrepujar os desafios impostos no cenário nacional e mundial.

Deve-se isto ao fato destas medidas terem produzido efeitos econômicos que beneficiaram o mercado da aviação nacional (Graupen, 2015). Observa-se, na Figura 1, que no período de 2000 a 2014 o crescimento na escolha por viajar por habitante foi mais de 163%.

Estes números mostram a importância do setor aeroportuário dentro do cenário de desenvolvimento urbano moderno. Sendo assim de grande relevância um estudo que analise esta relação e suas possibilidades. E torna-se oportuno que o estudo seja feita dentro do cenário de um aeroporto recém-privatizado, pois neste contexto o planejamento urbano a longo prazo pode ter maior impacto, dado que as receitas não-aeronáuticas são fortalecidas, dinamizando mais ainda o ambiente econômico em torno do aeroporto (Olariaga, 2015; Orth & Frei & Weidmann, 2015).

O objetivo geral deste artigo é analisar o setor aeroportuário na perspectiva do planejamento logístico urbano. Os objetivos específicos são: a) Analisar o impacto do setor aeroportuário para o alcance de objetivos de um planejamento logístico urbano; b) Desenvolver um estudo de caso sobre a Plataforma Ceará2050 para aprofundar a relação estudada nesta pesquisa.

A Plataforma Ceará2050, é o maior projeto de desenvolvimento sócio-econômico do estado do Ceará. Esta plataforma visa planejar e executar ações de desenvolvimento em todo o estado pelos próximos 30 anos (CEARA2050, 2019).

É observado que todo planejamento direcionado ao desenvolvimento econômico em grande escala, tem em seu escopo o planejamento logístico (Matera, 2012). E dentro do cenário dos grandes centros urbanos é vista a importância do planejamento logístico diretamente ligado ao setor aeroportuário; dada sua ampla capacidade de conectividade (Gomes & Bayer, 2011).

Torna-se então importante analisar esta relação de forma consistente pois são vários os ambientes econômicos ao redor do mundo em que esta relação da logística com o setor aeroportuário, se bem planejada, pode trazer benefícios múltiplos a todas as partes interessadas.

Assim, analisar um caso real onde esta relação está sendo desenvolvida para benefício

de vários setores da sociedade, pode trazer informações importantes para aplicação futura em outros cenários semelhantes.

Desta forma, tem-se a seguinte questão de pesquisa: Qual a importância estratégica do setor aeroportuário na perspectiva do planejamento logístico urbano a longo prazo?

Responder a esta questão e atingir os objetivos de estudo desta pesquisa podem trazer descobertas importantes para o contexto complexo de um planejamento urbano de longo prazo. Especificamente, informações relevantes dentro do setor logístico aeroportuário podem ser levantadas, diante do cenário da modernidade altamente exigente por conectividade em várias dimensões.

A escolha do cenário do estado do Ceará também deve-se ao fato do Aeroporto de Fortaleza ter seu tempo de concessão (30 anos) à empresa Fraport praticamente sobreposto ao tempo de execução do maior projeto de desenvolvimento sócio-econômico do estado do Ceará, a Plataforma Ceará2050. Este visa planejar e executar ações de desenvolvimento em todo o estado pelos próximos 30 anos (FRAPORT, 2018; ANAC, 2020; CEARA2050, 2019).

A seguir apresentam-se os fundamentos teóricos e metodológicos para o desenvolvimento desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Planejamento Logístico Urbano e o Aeroporto

A Logística teve seu primeiro grande momento marcado pela forte ligação com atividades básicas de transporte, carga e armazenamento. Mas com a dinâmica evolução das relações mercadológicas na indústria, surge a Logística Integrada, que trouxe a abordagem estratégica deste conceito organizacional (Matera, 2012; Silva & Rodrigues-Ferreira, 2016).

Esta visão estratégica da Logística é amplamente impulsionada pela competitividade dos mercados que estão cada vez mais conectados dentro do contexto de disputa por novos clientes (Matera, 2012). A conectividade é uma realidade inegável em várias dimensões da sociedade moderna. E no cenário de planejamento urbano de várias regiões em desenvolvimento avançado, a conectividade é uma necessidade (Khanna, 2016).

Esta conectividade está relacionada à implementação constante de novas tecnologias, que possibilitam comunicação precisa. E ainda, com velocidade e capacidade de alto nível do processamento de inúmeras informações. Acrescenta-se a isto, o desenvolvimento de infraestrutura de transportes (Khanna, 2016).

Neste contexto o desenvolvimento urbano e a implantação, assim como o desenvolvimento, de um sítio aeroportuário, possuem estratégica relação. O planejamento logístico urbano utiliza das atividades aeroportuárias para atender as demandas de conectividade moderna, que estão intimamente relacionadas ao desenvolvimento econômico interno e externo das regiões atendidas pelo aeroporto (Gomes & Bayer, 2011).

A necessidade de transporte de pessoas, cargas e informações são desafios presentes ao desenvolvimento regional brasileiro (Silva & Rodrigues-Ferreira, 2016). Portanto, as atividades aeronáuticas e não-aeronáuticas relacionadas ao aeroporto são elementos indispensáveis dentro de um planejamento logístico que propõe o desenvolvimento urbano moderno.

As áreas econômicas impactadas vão desde indústria, passando por comércio e serviços diversos, como o imediato impacto no setor de turismo (Matera, 2012; Silva & Rodrigues-Ferreira, 2016; Gomes & Bayer, 2011).

O desenvolvimento urbano centrado a partir do aeroporto está presente em várias regiões do mundo apresentando resultados consistentes. Assim, respostas às demandas econômicas e sociais dessas regiões, muitas vezes ampliadas pela necessidade de conectividade, são solucionadas e atendendo aos padrões de competitividade modernos (Boloukiana & Siegmannb, 2015).

2.2 Estudo de Caso: Planejamento Logístico Urbano e Setor Aeroportuário (Plataforma Ceará2050)

O planejamento logístico urbano está presente nos planejamentos governamentais públicos de forma estratégica para superar os desafios modernos para a sociedade. O presente estudo toma como objeto de análise o caso de um projeto de planejamento urbano a longo prazo no estado do Ceará, situado no nordeste brasileiro. Trata-se da Plataforma Ceará 2050 (CEARÁ2050, 2019).

A Plataforma Ceará 2050 é uma proposta do Governo do Estado do Ceará, com a intenção de ser um projeto para construir, de forma colaborativa, o futuro do Estado para os próximos 30 anos.

A Plataforma Ceará 2050 propõe o planejamento estratégico do Estado do Ceará a longo prazo, priorizando práticas de governança compartilhada e proporcionando o diálogo com entidades da sociedade civil organizada, órgãos governamentais, universidades e demais atores da sociedade. Todos os interessados em contribuir com a Plataforma Ceará 2050, todos liderados pelo Governo do Estado (CEARÁ2050, 2019). As principais fases deste projeto podem ser vistas na Figura 2:

Figura 2 As 5 fases do projeto - Plataforma Ceará 2050. Fonte: CEARÁ2050, 2019.

Nota-se que a proposta é analisar a situação geral do Ceará e, a partir destes insumos, planejar o futuro sustentável do estado. Também realizando ações que atinjam os indicadores determinados em cada sub-projeto a ser construído para as áreas estratégicas do estado.

A fase de Diagnóstico (Fase 1 do projeto) desenvolveu, dentre outras atividades, os Estudos Setoriais Especiais com o objetivo de enriquecer o Diagnóstico da Plataforma Ceará 2050.

Uma das áreas estudadas foi Transporte e Logística do estado, gerando assim o documento chamado Estudo Especial Setorial - Transporte e Logística, com o objetivo de fortalecer os futuros planejamentos de integração multimodal dentro do Ceará 2050, e do mesmo modo com a intenção de fortalecer o surgimento integrado de *hubs* neste setor.

O sistema aeroviário do Ceará foi estudado, juntamente com os outros modais de transporte do estado, e a partir das informações levantadas foi formulada a Análise Ambiental deste setor conforme apresentada no Quadro 1:

Quadro 1 Matriz da Análise Ambiental do Setor Aeroviário - Plataforma Ceará 2050

	Positivo	**Negativo**
Ambiente Interno	• Localização geográfica do Aeroporto Pinto Martins • Tempo de concessão à iniciativa privada	• Limitação de expansão da capacidade da pista de pouso/decolagem
Ambiente Externo	• Ampliação da demanda: HUB de passageiros e cargas • Novo aeroporto	• Legislações do uso do solo do entorno; • Novo aeroporto

O Quadro 1 mostra que o fato do Aeroporto Internacional de Fortaleza viver o momento de transição para a nova administração aeroportuária, pode significar um ponto positivo e negativo ao mesmo tempo para o Ambiente Externo do aeroporto.

Positivo, por ser a oportunidade de expansão das atividades aeroportuárias e comerciais; negativo, por conta de limitações burocráticas impostas pelos órgãos governamentais ao novo operador aeroportuário, como também as incertezas sobre o novo modelo de gestão e seus resultados, que será desenvolvido pela Fraport (Paula, 2018).

A localização estratégica da cidade de Fortaleza, e consequentemente do seu aeroporto, é evidenciada como vantagem interna do setor aeroportuário, e portanto fator importante para ser incluído no planejamento a longo prazo, dentro do Ceará 2050, relacionado a este setor. O Estudo Especial Setorial - Transporte e Logística apresenta também o levantamento da situação aeroportuária do

estado do Ceará como é apresentado na Figura 3:

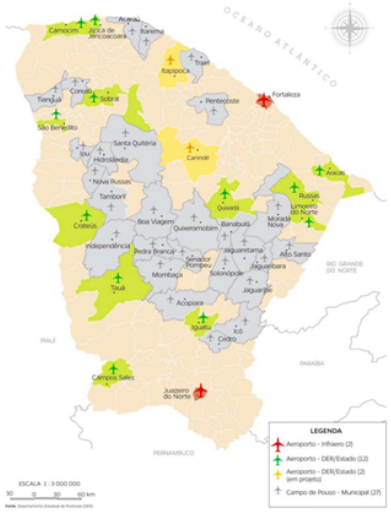


Figura 3 Mapa dos aeroportos do Ceará em 2017. Fonte: Paula, 2018.

Observa-se portanto que o setor aeroportuário tem sua relevância estratégica dentro da Plataforma Ceará 2050. Esta importância é vista na particularidade do setor aéreo e na sua possibilidade de integração com as demais áreas abordadas na plataforma.

O início dos trabalhos da plataforma também buscou construir a Visão de Futuro Ceará, documento que reúne diretrizes que descrevem a imagem desejada para o cenário do Estado do Ceará nos próximos 30 anos, a partir do que for determinado como as principais áreas estratégicas do estado.

Houve a necessidade de então desmembrar esta visão de futuro em objetivos que estão organizados em cinco áreas de resultados descritos a seguir: (i) Valor para a Sociedade; (ii) Cadeias Produtivas; (iii) Capital Humano; (iv) Serviços ao Cidadão e (v) Governança (CEARÁ2050, 2019). O Mapa Estratégico da Plataforma Ceará 2050 é visto na Figura 4:

Figura 4 Mapa estratégico da Plataforma Ceará 2050. Fonte: CEARÁ2050, 2019.

O objetivo estratégico relacionado às Cadeias Produtivas tem pertinência imediata para o presente estudo pois nele aborda-se informações sobre as vantagens competitivas do Estado (sendo uma delas a localização geográfica em relação a rotas aéreas), e sobre as possibilidades de integração multimodal (*hub* aéreo, terrestre e marítimo - portuário). Listando também os impactos que estas dimensões possuem sobre o desenvolvimento sustentável a longo prazo do estado do Ceará.

A Plataforma Ceará 2050 também desenvolveu o documento de Construção de Cenários onde a partir de análises das principais tendências das áreas estratégicas, conforme Mapa Estratégico aqui apresentado, e apresentou, com base em estudos consistentes, os principais cenários almejados pela Plataforma. Foram especificados os cenários otimistas e moderados.

Dentro dos levantamentos realizados na Construção de Cenários para o Ceará 2050, foram identificadas as seguintes oportunidades prioritárias para o futuro do estado (CEARÁ2050, 2018):

(i) Aproveitamento da posição estratégica geográfica, como hub marítimo e aéreo, de forma facilitar transações comerciais;

(ii) Expansão do setor privado, com redução de participação do Estado, através de Parcerias Público-Privado (PPP) e programas de desestatização;

(iii) Desenvolvimento do setor de serviços, tendo o Turismo como alavanca;

(iv) Aplicação de boas práticas para melhoria da eficiência na gestão pública, com ganhos de transparência e combate à corrupção.

As informações produzidas no desenvolvimento na Construção de Cenários da Plataforma Ceará 2050 serviram de base, além de outros estudos setoriais, para a elaboração de um conjunto de metas.

As metas indicadas pela Plataforma Ceará 2050, foram agrupadas em formato de linha de tempo, assumindo como referência os marcos temporais (anos) de 2025, 2030, 2040 e 2050 (CEARÁ2050, 2018).

Algumas metas que tem relação pertinente com esta pesquisa são apresentadas a seguir (CEARÁ2050, 2018):

(i) **Até 2025:** Dobrar a participação do estado nas exportações do país, Aumentar em mais de um terço a proporção nas indústrias de média e alta tecnologia;

(ii) **Até 2030:** Aumento de 50% na participação das exportações do país, Dobrar a quantidade de turistas que chegam ao estado, Alcance a média nacional do IDH;

(iii) **Até 2040:** Dois terços da economia local virão dos setores mais intensivos em tecnologia, Dois terços das estradas em conformidade com as melhores práticas nacionais;

(iv) **Até 2050:** Participação cearense no PIB nacional de 4,37%, Participação nacional das exportações com 5%, PIB per capita pelo menos mais de seis vezes que o atual, Quatro vezes mais turistas que a quantidade atual, 5% do território desertificado ante os 11,45% atuais, Dobro da movimentação de cargas atuais, Movimentação aeroportuária semelhante ao do estado Bahia.

Conforme proposto pela Plataforma Ceará 2050, projetos estratégicos devem ser desenvolvidos e colocados em prática a partir destas metas. O propósito é gerar no estado do Ceará um ambiente cada vez mais propício ao desenvolvimento social e econômico (CEARÁ2050, 2018).

Relacionado aos objetivos e metas acima comentados foi desenvolvido o Portfólio de Programas Estratégicos. Nele 20 programas tratam de áreas específicas mas consideradas estratégicas para o planejamento a longo prazo do estado.

Dentre estes, o Programa Logística do Atlântico trata do desenvolvimento da infraestrutura logística do Ceará a partir da integração de modais de transporte, simplificando barreiras alfandegárias e indicando melhorias capazes de potencializar a economia cearense.

Estudos realizados na Fase 1 da Plataforma Ceará 2050 observaram que a expansão integrada da estrutura multimodal no estado do Ceará trará melhorias ao escoamento da produção brasileira no que refere às regiões Norte/Nordeste elevando o status do papel cearense neste cenário (CEARÁ2050, 2019).

Esta plataforma estratégica de planejamento futuro estadual tem relação direta com estudos que vislumbram a expansão das atividades aeroportuárias no estado do Ceará, assumindo o Aeroporto de Fortaleza como o principal empreendimento aeroportuário para gerar novos níveis de integração multimodal para os próximos 30 anos (CEARÁ2050, 2019).

As informações produzidas até o presente momento pela Plataforma Ceará 2050 e os desdobramentos práticos indicados pela plataforma, podem gerar novas oportunidades no estado do Ceará que estejam especificamente relacionadas aos negócios aeroportuários (CEARÁ2050, 2019).

2.3 Síntese e contribuição

O trabalho tem contribuições relevantes para cenários urbanos semelhantes ao analisado nesta pesquisa. O estudo de caso se propôs a elucidar o ambiente atual de planejamento do futuro do estado Ceará, através das atividades da Plataforma Ceará 2050, e sua relação estratégica com o setor aeroportuário.

Observa-se na literatura a respeito do setor aeroportuário e seus impactos no desenvolvimento urbano que alguns conceitos são relevantes, conforme Quadro 2:

Quadro 2 Visão geral dos autores

Autores	Principais assuntos pesquisados pelos autores
DONAHUE, Brian	Planejamento da cidade a partir do aeroporto; Aeroporto além de um *Gateway,* ambiente de surgimento de novos negócios; aeroporto como centro de conectividade para negócios ligados às atividades da aviação
KHANNA, Parag	Conceito de Conectografia: Conectividade que redesenha o novo mapa-múndi; Importância da conectividade em suas várias possibilidades para economia e sociedade mundial; Conectividade como tendência mundial e cada vez mais

Autores	Principais assuntos pesquisados pelos autores
	crescente
OLARIAGA, Oscar Díaz	Análise da evolução recente e a importância das receitas não-aeronáuticas ou comerciais dos aeroportos; Análise: em nível mundial, as receitas comerciais representam em média cerca da metade das receitas totais de um aeroporto; fatores chave que influenciam as receitas comerciais do aeroporto, tais como perfil dos passageiros e tipo de aeroporto
ORTH, Hermann; FREI, Oliver; WEIDMANN, Ulrich	Atividades não aeronáuticas em grandes aeroportos e o impacto nos serviços de transporte público - positivos e negativos; Conectividade urbana - multimodalidade; atividades não aeronáuticas nos aeroportos pode, além de proporcionar benefícios comerciais aos envolvidos, levar a uma situação em que serviços de transporte público aprimorados se tornam viáveis.
NEUFVILLE, Richard de; ODONI, Amedeo R.	Sistemas aeroportuários; Infra-estrutura aeroportuária; Demanda de voos; Desenho estrutural e organizacional para aeroportos
YUJINA, L.; ZHIYONG, Z.	Desenvolvimento da zona econômica do aeroporto e tecnologias para o planejamento multimodal relacionado ao aeroporto.
BOLOUKIANA, R.; SIEGMANNB, J; WANG, K.; HONG, W.; BANAI, R.	Desenvolvimento urbano centrado no aeroporto; crescente investimento em negócios não aeronáuticos relacionados às atividades do aeroporto; Ambiente de competitividade de novos negócios ao redor do aeroporto; aeroporto-cidade; formulação estratégica para a construção de cidades aeroportuárias.

A multimodalidade de transportes em harmonia com os serviços aeroportuários também é tratada com relevância em alguns deste estudos acima citados, sendo um tema de grande importância para o desenvolvimento sustentável do modelo de aeroportos em grandes centros urbanos no mundo todo.

O estudo de caso observou o contexto do setor aeroportuário e sua conexão com o planejamento logístico urbano, no Ceará. Analisou-se seu cenário de pós-privatização do aeroporto e o início do período de planejamento e desenvolvimento de projetos estratégicos para as próximas três décadas através da Plataforma Ceará 2050.

Esta plataforma une poder público, universidades, iniciativa privada e sociedade civil para desenvolver o planejamento do estado do Ceará até 2050. Entende-se que o ambiente de planejamento futuro em um estado pode proporcionar, dentre outras atratividades, a abertura de diálogo com o poder público.

Pretende-se, assim neste trabalho, preencher uma lacuna da literatura existente sobre os assuntos aqui tratados, onde mostra-se, através de um estudo de caso real, o impacto estratégico do setor aeroportuário para alcance de objetivos propostos em um planejamento logístico urbano.

3. METODOLOGIA

Marconi e Lakatos (2003) afirmam que o método quando utilizado na ciência, representa o conjunto de atividades sistemáticas e racionais, que de forma segura possibilitam ao pesquisador atingir os objetivos de sua investigação científica.

Realizou-se neste trabalho uma pesquisa aplicada e, do ponto de vista de seus objetivos, a pesquisa foi exploratória pois trata-se também de um estudo de caso que procura desenvolver mais informações sobre o assunto tratado (Prodanov & Freitas, 2013).

A pesquisa documental que embasa as análises do estudo de caso e amplia o esclarecimento do assunto foi desenvolvida para o eficaz atingimento dos objetivos da pesquisa.

4. RESULTADOS

Analisando o desenvolvimento do planejamento urbano logístico a longo prazo a partir do estudo de caso da Plataforma Ceará2050, observou-se significativa importância do setor aeroportuário para atingimento de metas propostas dentro desta plataforma.

Nota-se que o setor aeroportuário recebeu estudos específicos. Estes estudos aprofundaram as informações sobre sua importância para o alcance de metas de um planejamento urbano logístico de longo prazo.

A Plataforma Ceará 2050 também desenvolveu o documento de Construção de Cenários onde a partir de análises das principais tendências das áreas estratégicas do estado do Ceará, apresentou, com base em

estudos consistentes, os principais cenários almejados pela Plataforma.

Dentro destes cenários, foram identificadas oportunidades prioritárias para o futuro do estado (CEARÁ2050, 2019). O aproveitamento da posição geográfica para a construção de um *hub* aéreo foi uma das prioridades apontadas.

Além das oportunidades do setor de turismo no estado, que também é diretamente impactado pelo desenvolvimento do setor aéreo.

Assim, observa-se que o setor aeroportuário está presente nas principais fases do planejamento logístico urbano de longo prazo, aqui estudado.

5. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o setor aeroportuário tem papel prioritário em um planejamento logístico urbano de longo prazo. Sendo indissociável a relação do desenvolvimento do setor aeroportuário e o alcance de alvos estabelecido no planejamento.

As oportunidades prioritárias estabelecidas na Plataforma Ceará2050 indicam a possibilidade do estado do Ceará e outras regiões semelhantes ao redor do mundo, terem como prioridade no planejamento logístico urbano de longo prazo o desenvolvimento de projetos robustos no setor aeroportuário.

Um exemplo disso é a implementação de modelos de aeroportos-indústria com foco no desenvolvimento industrial com a movimentação de cargas específicas.

E o desenvolvimento de aeroportos-cidade, onde a tecnologia impulsiona a conectividade exigida no mercado competitivo moderno, e receitas não-aeronáuticas são diferenciais competitivos que impactam o ambiente econômico interno e externo do setor aeroportuário (Kasarda, 2016).

Portanto o setor aeroportuário tem decisiva contribuição, para o alcance de alvos estratégicos, em um planejamento logístico urbano, principalmente se for no longo prazo e em cenários urbanos complexos.

Recomenda-se, para fins de aprofundamento no assunto, um estudo que envolva informações de atratividade de investimentos, no ambiente de planejamento urbano logístico; e investimentos do poder público que impactem o Plano Diretor da cidade de forma positiva para a construção de um aeroporto.

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 planejamento urbano logístico, como a importante análise da estrutura multimodal em torno do aeroporto.

Acredita-se que mais informações relevantes, sendo analisadas no contexto desta pesquisa, evidenciem mais ainda a importância do setor aeroportuário para a sustentabilidade do desenvolvimento urbano moderno.

Referências

ANAC. *Cadastro de aeródromos*. Brasília, DF, 2019. Disponível em:<https://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/aerodromos/cadastro-de-aerodromos/cadastro-de-aerodromos>. Acesso em: 22 set. 2019.

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.

Banai, R. The aerotropolis: urban sustainability perspectives from the regional city. *Journal of Transport And Land Use*, v. 10, n. 1, p.357-373, 15 dez. 2016. http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2016.889.

Boloukiana, R.; Siegmannb, J. Urban logistics: a Key for the airport-centric development - a review on development approaches and the role of urban logistics in comprehensive airport-centric planning. In: *The 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CITY LOGISTICS*. 2015. 9., Tenerife, Canary Islands (Spain). Proceedings [...]. Tenerife, Canary Islands (Spain): Elsevier, 17-19 June 2015

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.

Donahue, B. The rise of the aerotropolis. *Business Facilities*, v. 43, n. 8, p.10-44, set. 2010. Mensal. Disponível em:<www.BusinessFacilities.com>. Acesso em: 22 set. 2019.

FRAPORT Brasil - Fortaleza. (2018) *Aeroporto de Fortaleza.* Acesso em: 05 Abr, 2018, de http://www.fortaleza-airport.com.br/pt

Gomes, Cilene; Bayer, M. Sotto-Maior. Interações entre aeroporto, cidade e região: desafios para uma ação a respeito do caso de São José dos Campos (SP). *PosFauUSP*, São Paulo, v. 18, n. 29, p. 154-173, jun. 2011.

Graupen, A. G. K. *As políticas anticíclicas brasileiras da crise financeira de 2008: uma análise setorial*. 2015. 62f. Tese (Doutorado em Economia) – Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2015.

Kasarda, J. D. (2016) *Aerotropolis.* The University of North Carolina at Chapel Hill. Encyclopedia of Urban and Regional Studies

Khanna, P. (2016) *Connectography: mapping the future of global civilization.* Mapping the Future of Global Civilization. New York: Random House.

Matera, R. R. T. (2012) O desafio logístico na implantação de um aeroporto indústria no Brasil. *Journal of Transport Literature*, vol. 6, n. 4, pp. 190-214.

Maciel, C. F.; Santos Junior, W. R. dos; Proença, A. D. A. *O aeroporto contemporâneo e a sua função como projeto urbano: o caso de Viracopos* em Campinas (SP). In: IV ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO. 2016. 4., Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre, RS:ENANPARQ, 25 a 29 de Julho, 2016. p. 1 - 21.

Marconi, M. de A.; Lakatos, E. M. *Fundamentos de metodologia científica*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

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.

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.

Paula, F. S. M. *CEARÁ 2050 estudo setorial especial: transporte e logística*. Fortaleza/CE: Ceara 2050, 2018. 81 f. Disponível em:<http://www.ceara2050.ce.gov.br/api/wp-content/uploads/2018/10/ceara-2050-estudo-setorial-especial-transporte-logistica.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

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.

Silva, Fander de Oliveira; Rodrigues-Ferreira, William. Logística urbana e planejamento territorial: uma abordagem política. *Revista Geográfica de América Central*, [S.L.], v. 1, n. 56, p. 39-54, 19 maio 2016. Universidad Nacional de Costa Rica. http://dx.doi.org/10.15359/rgac.1-56.2.

TRANSPORTE. *Transporte e economia: transporte aéreo de passageiros*. Brasília: CNT, 2015. 84 p.

Wang, K.-J; Hong, W.-C. Competitive advantage analysis and strategy formulation of airport city development - the case of Taiwan. *Transport Policy*, v. 18, n. 1, p.276-288, jan. 2011. http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.08.011.

Yujina, L.; Zhiyong, Z (2013). Technical methods of comprehensive transportation plans in the airport economic zone taking xiaogan airport

economic zone as a case. In: 13th *Cota International Conference Of Transportation Professionals* (CICTP 2013). 2013, 13., Beijing, China. Proceedings [...]. Beijing, China, 2013.

ANÁLISE OPERACIONAL E GERENCIAL DE AERÓDROMOS TIPO CONDOMÍNIO AERONÁUTICO

Maurício Antoniazzi*, Daniel Corrêa de Carvalho Lery, Ivan Resende Leitão, Giovanna Miceli Ronzani Borille
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

*** Corresponding author's e-mail address**: mauricio500@gmail.com

PAPER ID: SIT2235

ABSTRACT

It is estimated that there are dozens of residential airparks (also known as fly-in communities) in Brazil nowadays. Most started operations less than ten years ago, driven by a growing demand: increase in general aviation users, high parking costs and shortage of suitable areas at public airfields, preference of aircraft owners for greater flexibility, and realization of recreational flights. This type of airdrome has several peculiarities and challenges, and it is not entirely developed for the needs of the Brazilian aeronautical community. To understand the current operational and managerial scenario of residential airparks in Brazil, a perception survey with users of these condominiums was performed, and their positive and negative characteristics were analyzed. The results show that convenience, less bureaucracy, lower costs, and living with people with shared objectives are the main positive aspects. At the same time, lack of proper infrastructure, poor management, and safety issues are the primary negative aspects mentioned by respondents. A comparison between the responses and the airdrome regulations in Brazil was also performed. It suggested a connection between the positive and negative elements perceived by the respondents and what is mandated by the law in force applicable to this category of airdrome. This observation suggests that the relevant regulation has an essential role in the development of the market and should be subject to broad debate among stakeholders in society.

Keywords: Residential Airpark, General Aviation, Airdrome Management, Airdrome Regulations, Private Airdrome.

1. INTRODUÇÃO

Os aeródromos tipo condomínio aeronáutico surgiram no cenário pós Segunda Guerra Mundial, nos EUA. Conforme relatos da imprensa, o primeiro condomínio aeronáutico foi idealizado pelo casal Doris e William Smilie, ao criarem o *Sierra Sky Park*, em Fresno, Califórnia, Estados Unidos da América (EUA), em outubro de 1946 (Paquette, 2001). A ideia original era tão simples quanto construir uma pista de pouso, demarcar terrenos para construção de casas, e ruas e avenidas largas o suficiente para a passagem de aeronaves e automóveis dos moradores e usuários do aeródromo. Atualmente, o condomínio aeronáutico pode ser definido como um bairro planejado, de acesso restrito aos moradores e seus convidados, que conta com estruturas que permitam a operação de aeronaves, como pistas de pouso e táxi, *hangares*, entre outras.

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, havia milhares de pilotos, grande quantidade de aeronaves de uso geral e inúmeras pistas de pouso disponíveis nos EUA. Essa grande disponibilidade de recursos humanos e materiais, bem como o crescimento econômico experimentado no pós-guerra, tornou possível o desenvolvimento de centenas de empreendimentos do tipo condomínio aeronáutico naquele país, onde, atualmente existem mais de 600 empreendimentos dessa categoria (Living With Your Plane Association, 2023). Esse mesmo fenômeno foi também observado em outros países, principalmente na Europa, porém em menor escala.

Conforme dados mais atuais disponibilizados pela *General Aviation Manufacturers Association*, o Brasil conta com a terceira maior frota de aeronaves de uso geral no mundo, com 21.579 aeronaves em 2019 (General Aviation Manufacturers Association, 2020). Os primeiros condomínios aeronáuticos no Brasil datam da década de 1980 e, mais recentemente, tem-se observado um crescimento nesse mercado com diversos lançamentos de novos condomínios (Aeromagazine, 2013). Enquanto nos EUA, e outros países europeus, o gatilho para o desenvolvimento desse mercado foi o grande número de pilotos e aeronaves disponíveis no pós Segunda Guerra, no Brasil pode-se citar que a escassez de área e os altos custos nos aeródromos públicos para estacionamento de aeronaves, além do interesse em contar com maior flexibilidade e realização de voos recreativos, têm levado os proprietários de aeronaves a buscar esse tipo de empreendimento.

Dessa forma, o objetivo do trabalho é analisar o cenário operacional e gerencial desse tipo de aeródromo e seus pontos positivos e negativos. Para tanto, foi realizada uma pesquisa de percepção com usuários desses condomínios e foi comparado o resultado da pesquisa com a regulamentação aeronáutica aplicável a essa categoria de aeródromo.

2. METODOLOGIA

A metodologia abrange quatro principais etapas, a saber: (i) elaboração de questionário, (ii) aplicação da pesquisa *on-line*, (iii) análise das respostas e (iv) comparação com a regulamentação aeronáutica em vigor. A pesquisa foi desenvolvida de forma a capturar o perfil do usuário típico desse tipo de aeródromo e suas percepções positivas e negativas relativas aos seus aspectos gerenciais e operacionais. A pesquisa garantiu o anonimato dos respondentes e foi realizada por meio de formulário *on-line*, com perguntas fechadas e obrigatórias, complementadas com perguntas abertas para comentários opcionais e distribuídas através de diversos grupos de mensagens de usuários desse tipo de empreendimento.

Para conhecer o perfil dos usuários foram solicitados dados de experiência aeronáutica, frequência e finalidade das visitas aos condomínios, habilitações e condomínios visitados. Para o entendimento de suas percepções foram solicitadas as principais virtudes e deficiências desse tipo de aeródromo, seus aspectos de satisfação/insatisfação, sugestões de melhorias e desafios para sua implementação, além de comentários gerais.

Por fim, foi desenvolvida uma análise das regulamentações aeronáuticas relativas aos aeródromos no Brasil, em particular àquelas aplicáveis à classe de aeródromo a qual se encaixam os condomínios aeronáuticos, conforme emitidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

O objetivo da análise é verificar se há conexão entre a regulamentação em vigor e a percepção dos usuários em relação aos

condomínios aeronáuticos brasileiros.

3. REVISÃO DA REGULAMENTAÇÃO AERONÁUTICA VIGENTE

3.1 Regulamentação dos Aeródromos no Brasil

No Brasil, a atividade aeronáutica é regulamentada através do Código Brasileiro de Aeronáutica (Brasil, 1986), e suas revisões posteriores, onde, dentre outras providências, dispõe-se sobre os aeródromos.

Aeródromo é toda área destinada a pouso, decolagem e movimentação de aeronaves. Os aeródromos dividem-se em civis (destinado ao uso de aeronaves civis) e militares (destinado ao uso de aeronaves militares). Os aeródromos civis poderão ser utilizados por aeronaves militares, e os aeródromos militares, por aeronaves civis, obedecidas as prescrições estabelecidas pela autoridade aeronáutica (Brasil, 1986).

Os aeródromos civis são divididos em públicos e privados (Brasil, 1986). Os aeródromos públicos são aqueles de uso do público em geral, onde operam empresas de transporte aéreo regulares e charter, transporte de passageiros, cargas, táxi-aéreo, atividades de manutenção, entre outras. Os aeródromos públicos são aqueles construídos, mantidos e explorados diretamente pela União, por empresas especializadas da Administração Federal Indireta ou suas subsidiárias, mediante convênio com os Estados ou Municípios ou por concessão ou autorização (Brasil, 1986).

Já os aeródromos civis privados são aqueles que só poderão ser utilizados com permissão de seu proprietário, sendo vedada a sua exploração comercial (Brasil, 1986) e serão construídos, mantidos e operados por seus proprietários, obedecidos as instruções, as normas e os planos da autoridade aeronáutica (Brasil, 2022).

3.2 Normas Regulamentadoras Aplicáveis para Aeródromos Privados

De maneira geral, todos os aeródromos civis no Brasil, públicos ou privados, devem submeter-se aos Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil (RBAC), emitidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), dentre suas partes aplicáveis, quais sejam:

- RBAC 139 - Certificação Operacional de Aeroportos.
- RBAC 153 - Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à Emergência.
- RBAC 154 - Projeto de Aeródromos.

3.3 RBAC 139 - Certificação Operacional de Aeroportos

Um dos principais requisitos regulamentados pela RBAC 139 é o Manual de Operações do Aeródromo (MOPS), cujo objetivo é padronizar os serviços e facilitar a gestão aeroportuária, a comunicação e a instrução de seu pessoal e demais provedores de serviços diretamente relacionados à operação do aeródromo (Agência Nacional de Aviação Civil, 2022). Dentre as informações mínimas necessárias para o MOPS, conforme requisito RBAC 139.311, as principais são listadas abaixo:

- Organograma do operador de aeródromo.
- Procedimento para revisão de conteúdo e controle de revisões do MOPS.
- Identificação de responsabilidades pela execução das atividades do MOPS e para acesso à área operacional.
- Descrição do aeródromo, contendo informações sobre suas características físicas e operacionais.
- Lista de níveis equivalentes de segurança e isenções concedidos pela ANAC, bem como os procedimentos identificados como medidas mitigadoras adicionais.
- Especificações operativas do aeródromo.
- Procedimentos do operador do aeródromo sobre: requisitos e treinamentos para o pessoal operacional, gerenciamento da segurança operacional, operações e manutenção aeroportuárias, gerenciamento do risco da fauna e resposta à emergência.

Além dos pontos destacados que devem ser contidos no MOPS, o RBAC 139 também determina que os aeródromos devem ser cadastrados junto à ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil, 2022).

Esses pontos, juntamente com o devido

requerimento e o seguimento do processo de certificação conforme o RBAC 139, são requisitos mandatórios para a obtenção do Certificado Operacional de Aeroporto, que deve ser obtido pelo operador de aeródromo civil no Brasil.

3.4 RBAC 153 - Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à Emergência

O RBAC 153, traz uma série de requisitos baseado na classificação do aeródromo. A classe do aeródromo é definida em função do número de passageiros processados, considerando a média aritmética de passageiros processados em um período de referência (geralmente 3 anos anteriores ao ano corrente) e o tipo de voo que o aeródromo processa no ano corrente (Agência Nacional de Aviação Civil, 2021a).

O tipo de aeródromo com o menor nível de requisitos mandatórios é o Classe I-A, que processa menos de 200.000 passageiros por ano e não processa voos regulares. É esperado que os aeródromos tipo condomínio aeronáutico, sejam enquadrados na Classe I-A, dado o volume de passageiros e a operação não regular dos voos.

O Apêndice A do RBAC 153 detalha os requisitos quanto à classe do aeródromo. Nota-se que a maioria dos requisitos do RBAC 153 não são obrigatórios aos aeródromos Classe I-A, destacando-se os principais requisitos não obrigatórios abaixo:

- Habilitação dos responsáveis por atividades específicas.
- Existência de responsável técnico pelos serviços referentes à manutenção aeroportuária de seu aeródromo.
- Treinamento dos profissionais que exercem atividades específicas.
- Implantação do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional.
- Estabelecimento de Níveis Aceitáveis de Desempenho de Segurança Operacional.
- Comissão de Segurança Operacional.
- Gerenciamento dos riscos de segurança operacional.
- Monitoramento da condição física e operacional do aeródromo.
- Sistema de manutenção aeroportuária.
- Recursos necessários para o atendimento às emergências aeroportuárias.

No entanto, ainda no Apêndice A do RBAC 153, temos os itens obrigatórios, mesmo para os aeródromos Classe I-A, dentre os quais os principais são os seguintes:

- Constituição do operador de aeródromo e pessoa jurídica.
- Declaração de comprometimento com a garantia da segurança.
- Informações aeronáuticas.
- Proteção da área operacional.
- Prevenção de incursão em pista.
- Manutenção da área pavimentada, áreas verdes e sistema de drenagem.
- Auxílios visuais para navegação e indicação de áreas de uso restrito.
- Plano de emergência em aeródromo simplificado.
- Plano contra incêndio, somente se possuir Serviço de Prevenção, Salvamento e Combate a Incêndio em Aeródromos Civis implantado.
- Gerenciamento do risco da fauna.

Como percebe-se na análise do Apêndice A do RBAC 153, os requisitos operacionais obrigatórios a um aeródromo Classe I-A são menos rigorosos que os aplicáveis aos aeródromos onde registra-se maior movimentação de passageiros e que contam com operações regulares.

Tal constatação é esperada para viabilizar a operação de tais aeródromos. No entanto, podem surgir lacunas de segurança, operacionais ou de atividades ilícitas, que precisam ser entendidas e avaliadas em cada caso.

3.5 RBAC 154 - Projeto de Aeródromos

O RBAC 154 não tem sua aplicabilidade obrigatória para aeródromos privados, somente públicos, conforme informado no regulamento (Agência Nacional de Aviação Civil, 2021b). No entanto, seus requisitos podem ser utilizados como melhores práticas para os aeródromos privados, sempre que aplicável.

Com o desenvolvimento do mercado, espera-se que os condomínios aeronáuticos mais modernos incorporem recursos cada vez mais sofisticados, tanto como estratégia de *marketing*, de forma a atrair novos moradores, quanto para aumentar os níveis de segurança do aeródromo.

Para isso, a padronização fornecida pelo regulamento é de suma importância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Metodologia de Análise dos Resultados da Pesquisa

A pesquisa foi realizada através da plataforma *Google Forms*, e foi disponibilizada ao público entre os dias 28 de março de 2023 e 19 de abril de 2023, distribuída através de grupos em aplicativos de mensagens. Foi recebido um total de 85 respostas ao questionário.

Para as perguntas abertas, foi feita uma síntese das respostas, buscando por palavras ou expressões que sintetizassem o significado da resposta recebida para posterior agrupamento e classificação. Em diversas das respostas recebidas foram identificadas mais de uma palavra ou expressão, sendo todas consideradas no agrupamento e classificação, dessa forma poderá haver uma quantidade total de respostas maior do que o número total de respondentes e quantidades de respostas diferentes para diferentes perguntas.

4.2 Análise do Perfil dos Respondentes

Os resultados da pesquisa mostram que os entrevistados são aeronautas experientes (mais de 75% dos respondentes com mais de 10 anos de experiência) (Figura 1), a quase totalidade (97,6%) com alguma habilitação de piloto (Figura 2), visitantes assíduos (mais de 40% dos respondentes com mais de 20 visitas nos últimos 12 meses) (Figura 3), incluindo muitos proprietários de *hangares* e aeronaves (44,7% dos respondentes) (Figura 4).

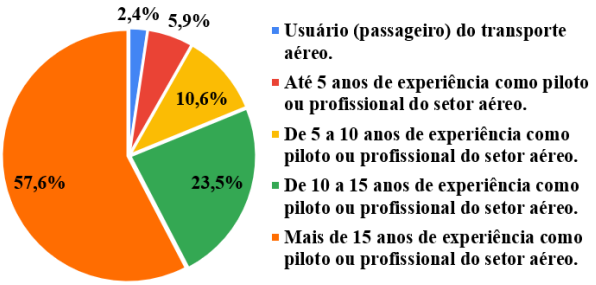


Figura 1 Experiência em Operações Aéreas.

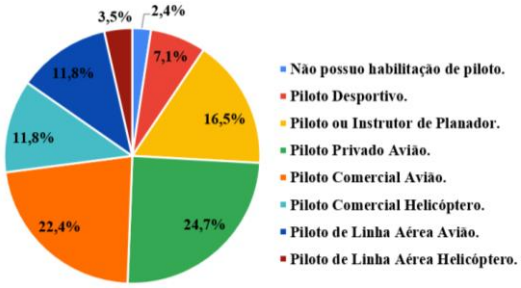


Figura 2 Habilitação de Pilotos dos Respondentes da Pesquisa.

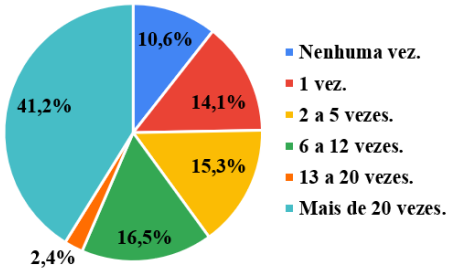


Figura 3 Frequência de Visitas aos Condomínios Aeronáuticos nos Últimos 12 Meses.

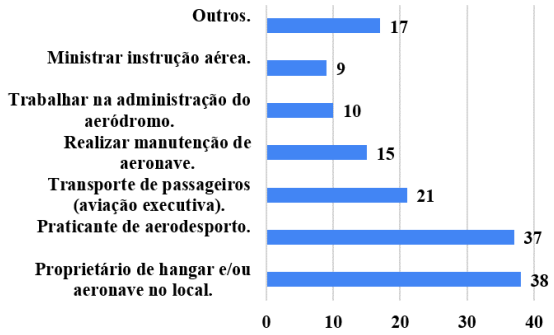


Figura 4 Finalidade das Visitas aos Condomínios Aeronáuticos.

Dos respondentes, a grande maioria realizou operações de voo no Brasil (74,1%) ou tanto no Brasil quanto no exterior (14.1%) (Figura 5). Além disso, apresenta-se uma base de respondentes com experiências geográficas bastante diversas, com aeródromos visitados em todas as regiões do Brasil, apesar da maior prevalência nas regiões Sul (17 dos 42 aeródromos brasileiros citados) e Sudeste (12 dos 42 aeródromos brasileiros citados), além da Flórida (2 aeródromos) nos EUA. Citou-se um total de 44 aeródromos na pesquisa (Figura 6, mostrando aeródromos somente no Brasil).

No entanto, observa-se que a ampla maioria dos respondentes (65.9%) não participa da administração dos condomínios, seja direta ou indiretamente (Figura 7).

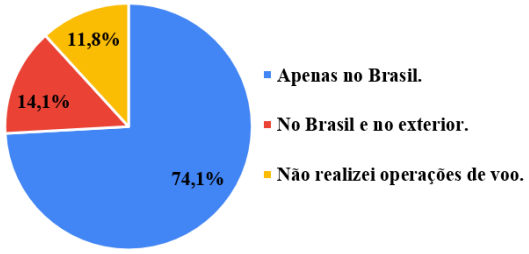


Figura 5 Operações de Voo em Condomínios Aeronáuticos no Brasil e Exterior.

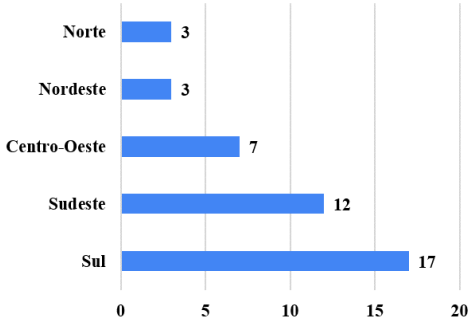


Figura 6 Condomínios Aeronáuticos Mais Visitados (por Região, somente Brasil).

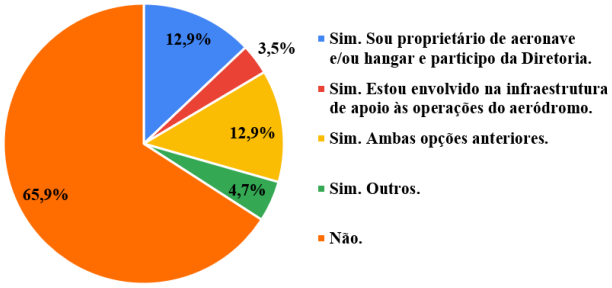


Figura 7 Envolvimento na Administração de Condomínios Aeronáuticos.

4.3 Principais Pontos Positivos Observados na Pesquisa

As principais virtudes levantadas na pesquisa são a conveniência (44 respostas, 45.8%), menor burocracia (17 respostas, 17.8%) e a convivência com pessoas com objetivos comuns (13 respostas, 13.5%) (Figura 8).

Já os principais pontos de satisfação dos respondentes da pesquisa são o custo de operação (68 respostas, 80%), a infraestrutura operacional (50 respostas, 58.8%), processo de embarque na aeronave (49 respostas, 57.6%), infraestrutura de acesso terrestre (46 respostas, 54.1%), controle de acesso (46 respostas, 54.1%), e infraestrutura de apoio à atividade aérea (43 respostas, 50.6%) (Figura 9).

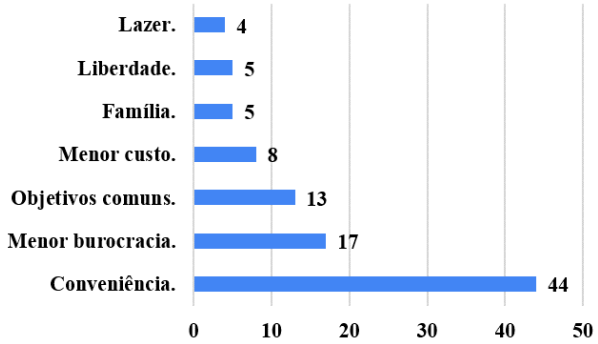


Figura 8 Principal Virtude dos Aeródromos Tipo Condomínio Aeronáutico.

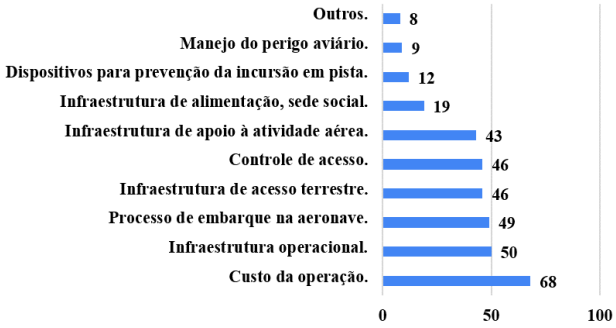


Figura 9 Principais Pontos de Satisfação dos Aeródromos Tipo Condomínio Aeronáutico.

4.4 Principais Pontos Negativos Observados na Pesquisa

As principais deficiências levantadas na pesquisa são infraestrutura (25 respostas, 24.8%), gestão (19 respostas, 18.8%) e segurança operacional (*safety*) (13 respostas, 12.9%). Observa-se que 24 dos 85 respondentes (28.2%) não identificam deficiências (Figura 10).

Já os principais pontos de insatisfação dos respondentes da pesquisa são dispositivos para prevenção da incursão em pista (30 respostas, 35.3%), infraestrutura de alimentação e sede social (26 respostas, 30.6%), manejo do perigo aviário (26 respostas, 30.6%), infraestrutura de acesso terrestre (25 respostas, 29.4%) e controle de acesso (16 respostas, 18.8%) (Figura 11).

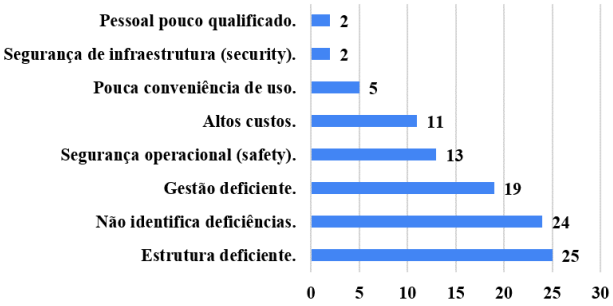


Figura 10 Principal Deficiência dos Aeródromos Tipo Condomínio Aeronáutico.

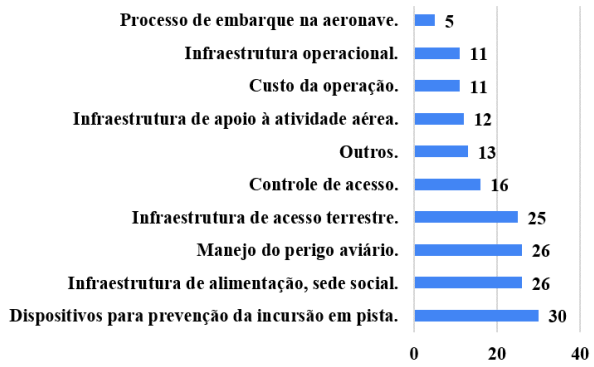


Figura 11 Principais Pontos de Insatisfação dos Aeródromos Tipo Condomínio Aeronáutico.

4.5 Principais Sugestões de Melhorias e Desafios Para Implementação

As principais sugestões de melhorias observadas na pesquisa são em infraestrutura (36 respostas, 35.6%), redução de burocracia (11 respostas, 10.9%), redução de custos (9 respostas, 8.9%) e em segurança operacional (*safety*) (9 respostas, 8.9%). Observa-se que 22 dos 85 respondentes (25.9%) não identificaram sugestões de melhorias a fazer (Figura 12).

Figura 12 Principais Sugestões de Melhorias para os Aeródromos Tipo Condomínio Aeronáutico.

Os principais desafios para implementar as melhorias sugeridas são relativos à burocracia (25 respostas, 26.3%), custos (22 respostas, 23.2%), maior fomento à aviação (14 respostas, 14.7%) e gerenciamento (9 respostas, 9.5%). Observa-se que 15 dos 85 respondentes (17.6%) não identificam desafios para implementação de melhorias sugeridas (Figura 13).

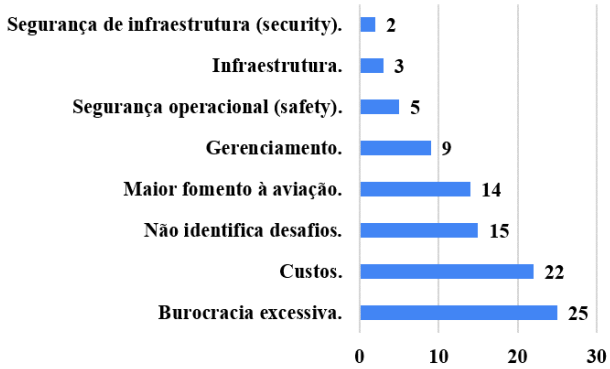


Figura 13 Principais Desafios Identificados para Implementação das Melhorias nos Aeródromos Tipo Condomínio Aeronáutico.

4.6 Comparativo entre Ambiente Regulatório e Resultados da Pesquisa

A análise do ambiente regulatório brasileiro demonstra que esta é menos exigente para aeródromos com menor frequência de operações e menor número de passageiros processados, o que é esperado, de forma a viabilizar sua operação (conforme o RBAC 153).

Isso fica refletido na pesquisa de percepção. Ao analisar os pontos positivos dos condomínios aeronáuticos, nota-se a conveniência (relacionada à fatores como proximidade a locais de interesse e facilidade de uso em geral) e convivência com pessoas com objetivos comuns, como fatores subjetivos, mas que influenciam na decisão de indivíduos interessados em adquirir uma propriedade em um condomínio desse tipo, além de fatores objetivos, como menor burocracia e menores custos de operação (dois dos pontos mais citados ao longo de toda a pesquisa) e facilidades relacionadas à infraestrutura, que também se relacionam com a conveniência do seu uso. Como as exigências regulatórias são menores, é esperado que sejam mais flexíveis, menos burocráticas e de menor custo que as exigências aplicadas a aeródromos públicos, ou mesmo privados, de maior movimento.

Ao analisar os pontos negativos, deficiências e oportunidades de melhoria, nota-se questões relacionadas à infraestrutura, gestão e segurança operacional (*safety*). No aspecto relacionado à infraestrutura em geral, cita-se pontos relacionados à disponibilidade de alimentação, sede social, acesso terrestre e controle de acesso. No aspecto relacionado à gestão, cita-se falta de cumprimento de regras aeronáuticas, pessoal pouco qualificado e falta de

profissionalismo, falta de informações e falta de segurança jurídica referente ao uso da terra no aeródromo. No aspecto de *safety* especificamente citando a falta de dispositivos para evitar incursão indevida em pista e manejo do perigo aviário (apesar de serem pontos obrigatórios conforme RBAC 153).

Em ambos os aspectos, positivos e negativos, as observações vão ao encontro, principalmente, do RBAC 153, onde, para os aeródromos Classe I-A, uma série de requisitos não são obrigatórios, conforme exposto na revisão da regulamentação aeronáutica vigente.

Baseado nesta observação, conforme já exposto, pode-se discutir quais as melhores alternativas para melhoria do ambiente regulatório, preservando os pontos positivos, melhorando os pontos deficientes, sem, no entanto, gerar regras que prejudiquem o desenvolvimento do setor.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Limitações do Trabalho

Como limitação do trabalho, pode-se citar que a base total de potenciais respondentes pode ser maior que o total de respostas recebidas, uma vez que não há dados oficiais do número e de quais são os aeródromos tipo condomínio aeronáutico existentes atualmente no Brasil. Dessa forma, não é possível saber com precisão o atual tamanho da população de potenciais respondentes. Além disso, mesmo tendo obtido uma relativa ampla variedade geográfica nas respostas, a amostra coletada pode ser tendenciosa, já que a pesquisa foi distribuída por meio de grupos de aplicativos de mensagens.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se: a) ampliar a base de pesquisados, b) coletar o ponto de vista dos administradores dos condomínios aeronáuticos, empresas construtoras, autoridades aeronáuticas e da administração pública que têm relação com a construção dos condomínios, tanto na parte residencial, quanto na parte aeronáutica, c) realizar levantamento de todos os condomínios aeronáuticos no Brasil, d) analisar o enquadramento jurídico dos aeródromos tipo condomínio aeronáutico no Brasil, e) realizar levantamento de incidentes e acidentes ocorridos em condomínios aeronáuticos, buscando por fatores contribuintes que possam ter relação com as deficiências identificadas pela presente pesquisa e, f) comparar o ambiente regulatório brasileiro com o dos EUA, uma vez que este país é o que conta com o maior número de condomínios aeronáuticos, pode-se utilizá-lo como referência para futuras melhorias no ambiente regulatório brasileiro, visando não somente fomentar a atividade aeronáutica no Brasil, mas também melhorar os níveis de segurança operacional e infraestrutura em geral, caso as eventuais diferenças encontradas sejam aplicáveis à realidade do mercado brasileiro.

5.3 Conclusões

O Brasil, enquanto terceiro maior mercado de aviação geral do mundo, possui um enorme potencial para ampliar ainda mais o desenvolvimento do seu mercado aeronáutico, e os condomínios aeronáuticos podem fazer parte desse avanço. A pesquisa realizada sugere que a percepção dos usuários dos condomínios aeronáuticos é muito alinhada à legislação em vigor. Requisitos menos exigentes resultam em maior flexibilidade, menores custos e burocracia, mas também incorrem em reduzida segurança operacional (*safety*), fragilidade gerencial, potenciais necessidades de melhorias em infraestrutura e segurança (*security*). Isso mostra a importância que uma regulamentação alinhada à evolução do mercado pode ajudar a desenvolvê-lo, ou, caso contrário, sufocá-lo. Notou-se uma preocupação dos respondentes em reconhecer o modelo atual como positivo, mas com oportunidades de melhoria, e as preocupações em não se criar demasiadas regras e regulamentos que prejudiquem seu desenvolvimento, além de fomentar a aviação e a cultura aeronáutica em geral no país.

Esses aspectos corroboram a visão apresentada na introdução do trabalho. Enquanto nos EUA, o maior mercado aeronáutico do mundo e referência para o desenvolvimento da aviação, os fatores que levaram ao aparecimento dos condomínios aeronáuticos foram a grande quantidade de recursos no pós Segunda Guerra (pilotos, aeronaves e pistas de pouso), além do forte crescimento econômico experimentado naquela época. No Brasil o fenômeno é mais

recente e motivado por altos custos, demasiada burocracia e escassez de áreas disponíveis em aeródromos públicos, o que levou os interessados a buscarem de forma autônoma uma solução para estacionamento adequado de suas aeronaves, ambiente propício para fomento da atividade aeronáutica com maior flexibilidade e sem as amarras dos aeródromos públicos de grande movimento. Uma vez que o mercado evolua e se consolide, é esperado que se profissionalize, atraindo investimentos, novos lançamentos e melhoria dos condomínios já existentes.

Dessa forma, atinge-se o objetivo do trabalho, em analisar o cenário operacional e gerencial dos aeródromos tipo condomínio aeronáutico, seus pontos positivos e principais vulnerabilidades operacionais e gerenciais. Nota-se que há diversos pontos positivos no modelo atual e espaço para crescimento do mercado. No entanto existem deficiências que podem ser sanadas com o amplo debate, aberto e transparente, no ambiente adequado e entre todos os entes envolvidos da sociedade, para melhoria dos aspectos deficientes e manutenção dos aspectos positivos identificados.

REFERENCIAS

Aeromagazine (2013). *Um avião na garagem*. Disponível em: https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/um-aviao-na-garagem_967.html. Acesso em: 06 de abril de 2023.

Agência Nacional de Aviação Civil (2022). *RBAC - Regulamento Brasileiros da Aviação Civil - Nº 139 - Certificação Operacional de Aeroportos - Emenda nº 06*. Vigente em: 03 de outubro de 2022. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-139. Acesso em: 06 de abril de 2023.

Agência Nacional de Aviação Civil (2021a). *RBAC - Regulamento Brasileiros da Aviação Civil - Nº 153 - Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à Emergência - Emenda nº 06*. Vigente em: 01 de abril de 2021. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-153. Acesso em: 06 de abril de 2023.

Agência Nacional de Aviação Civil (2021b). *RBAC - Regulamento Brasileiros da Aviação Civil - Nº 154 - Projeto de Aeródromos - Emenda nº 07*. Vigente em: 01 de julho de 2021. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-154. Acesso em: 06 de abril de 2023.

Brasil (1986). *Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986*. Diário Oficial da União: Brasília, DF, p. 19.567, 23 dez. 1986. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7565compilado.htm. Acesso em: 04 de abril de 2023.

Brasil (2022). *Lei nº 14.368, de 14 de junho de 2022*. Diário Oficial da União: Brasília, DF, p. 2, 15 jun. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Lei/L14368.htm#art14. Acesso em 04 de abril de 2023.

General Aviation Manufacturers Association (2020). *2019 Databook*. Disponível em: https://gama.aero/wp-content/uploads/GAMA_2019Databook_Final-2020-03-20.pdf. Acesso em: 06 de abril de 2023.

Living With Your Plane Association, 2023. *Associação de Condomínios Aeronáuticos nos Estados Unidos da América*. Disponível em: https://livingwithyourplane.com/#/. Acesso em: 06 de abril de 2023.

Paquette, L. (2001). *50-Year Flight of Fancy – An entrepreneurial husband-and-wife team turned their dream of an airport community into the premiere residential skypark*. Plane and Pilot Magazine, 14 de julho de 2001. Disponível em: https://web.archive.org/web/20070927234723/http://www.planeandpilotmag.com/content/pastissues/2001/jun/fifty.html. Acesso em: 21 de março de 2023.

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO CBR DO SUBLEITO PARA DIFERENTES AERONAVES

Lucas Cavalcante de Almeida, Antonia Fabiana Marques Almeida, Francisco Heber Lacerda de Oliveira, Mariana de Araújo Leite
Instituto Federal do Ceará, Universidade Federal do Ceará, Centro Universitário Católica de Quixadá

*** Corresponding author e-mail address**: lucascavalcante@det.ufc.br

PAPER ID: SIT2301

RESUMO

A deformação no topo do subleito é um aspecto crítico a ser considerado no projeto de dimensionamento de pavimentos aeroportuários. A capacidade de suporte do subleito é, geralmente, avaliada pelo Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio* - CBR). Em pavimentos aeroportuários, a deformação do subleito ocorre principalmente devido à carga aplicada pelas aeronaves durante as operações de pouso e decolagem. O subleito com baixa resistência pode levar à deformação excessiva. Isso, por sua vez, pode resultar em uma diminuição da vida útil da estrutura do pavimento devido ao surgimento de falhas estruturais. Além disso, pode demandar um aumento das espessuras das camadas superiores na etapa de dimensionamento, o que pode elevar o custo de implantação do pavimento ou da sua manutenção ao longo do tempo. Ao utilizar valores de CBR para o subleito variando entre 4% e 10% para uma simulação realizada em *software* que avalia tensão e deformação no pavimento de acordo com as características do próprio pavimento aeroportuário e das aeronaves, este estudo tem o objetivo de analisar se a variação na deformação do topo do subleito é influenciada pelas características das aeronaves. Com base nos resultados obtidos, foi observado que um aumento no valor de CBR resulta em uma redução na deformação do subleito. No entanto, é importante considerar outros fatores, como a espessura do pavimento e as características específicas das aeronaves, pois foi constatado na simulação que o peso da aeronave, a configuração do trem de pouso e a pressão nos pneus possui influência na deformação no topo do subleito.

Palavras-chave: Avaliação estrutural, Dimensionamento, Subleito, Pavimento, Aeroporto.

1. INTRODUÇÃO

Para dimensionar um pavimento flexível aeroportuário, considerando o método empírico-mecanístico, são necessários, no mínimo, os módulos de elasticidade de cada camada da estrutura e o valor do CBR (*California Bearing Ratio*) do subleito (FAA, 2016). Além disso, deve-se fornecer a composição das aeronaves (*mix*) que utilizarão as pistas do aeródromo.

Essas informações permitem conhecer se a capacidade da estrutura dimensionada atende ao tráfego (quantidade e peso) sem sofrer danos excessivos, sobretudo no topo do subleito, geralmente a parte mais sensível do pavimento. Assim, é importante um dimensionamento adequado e um monitoramento contínuo das estruturas da área pavimentada do aeródromo.

No que diz respeito à avaliação estrutural de pavimentos aeroportuários, a deflexão é uma medida estrutural que reflete as deformações elásticas pelas camadas do pavimento com a aplicação das cargas do tráfego. Em pavimentos aeroportuários as cargas são mais elevadas que os rodoviários, logo, as respostas aos carregamentos tendem a ser mais elevadas, podendo gerar maiores deflexões do pavimento em serviço.

Uma forma de obter esses dados é utilizando a Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que permite obter a deformação no topo do subleito. Esses valores podem ser calculados para cada aeronave e, com variação do CBR do subleito, utilizados para compreender o impacto desses parâmetros na deformação da camada.

Assim, o objetivo deste trabalho é analisar se há influência das cargas de seis tipos de aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso e pressão dos pneus na deformação no topo do subleito com variação dos valores de CBR dadas as cargas originadas sob as rodas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Kim (2009), a previsão da vida de serviço do pavimento é um dos maiores desafios dos engenheiros de pavimentação. Para Huang (2004), os modelos de desempenho que buscam estimar a vida útil do pavimento é a parte restritiva nos métodos mecanístico-empíricos, pois requerem uma robusta calibração e verificação de dados de campo para serem plenamente confiáveis.

De acordo com AAA (2017), existem três respostas que devem ser monitoradas quando o pavimento aeroportuário é submetido à aplicação de uma carga oriunda do tráfego, a saber:

i. a deflexão, que é o valor absoluto pelo qual um determinado ponto do pavimento se desloca em resposta à carga aplicada e geralmente é da ordem de 1 a 2 mm;
ii. a tensão, que é a força espraiada por área e equivale à pressão dentro de um pneu. Essa tensão se altera gradativamente com a profundidade do pavimento e é da ordem de 0,01 MPa a 2 MPa; e
iii. a deformação, que é a mudança na dimensão de um material ou camada, expressa como uma porção do comprimento sobre o qual a mudança ocorreu, sendo adimensional sendo fornecida em m/m. As deformações em um pavimento aeroportuário variam da ordem de 1×10^{-3} a 2×10^{-3}.

Ainda de acordo com AAA (2017), a deformação do pavimento é a base para calcular o dano causado pela carga de uma aeronave, e, dessa forma, calcular a vida útil do pavimento flexível. Nesse sentido, segundo Tamagusko (2020), entre os principais fatores que influenciam o projeto de pavimentos aeroportuários pode-se enumerar a forma como a carga é aplicada pela aeronave no pavimento. Isto posto, é fundamental entender a geometria ou configurações dos trens de pouso das aeronaves.

Em relação ao trem de pouso, vale ressaltar que existem três configurações básicas, sendo elas: roda simples, roda dupla e tandem duplo. Existem configurações mais complexas, tais como: duplo tandem duplo, tandem triplo e tandem duplo mais tandem triplo. A Figura 1 apresenta as configurações supracitadas, sendo que neste artigo serão analisadas as configurações correspondentes a

roda dupla, tandem triplo e duplo tandem duplo.

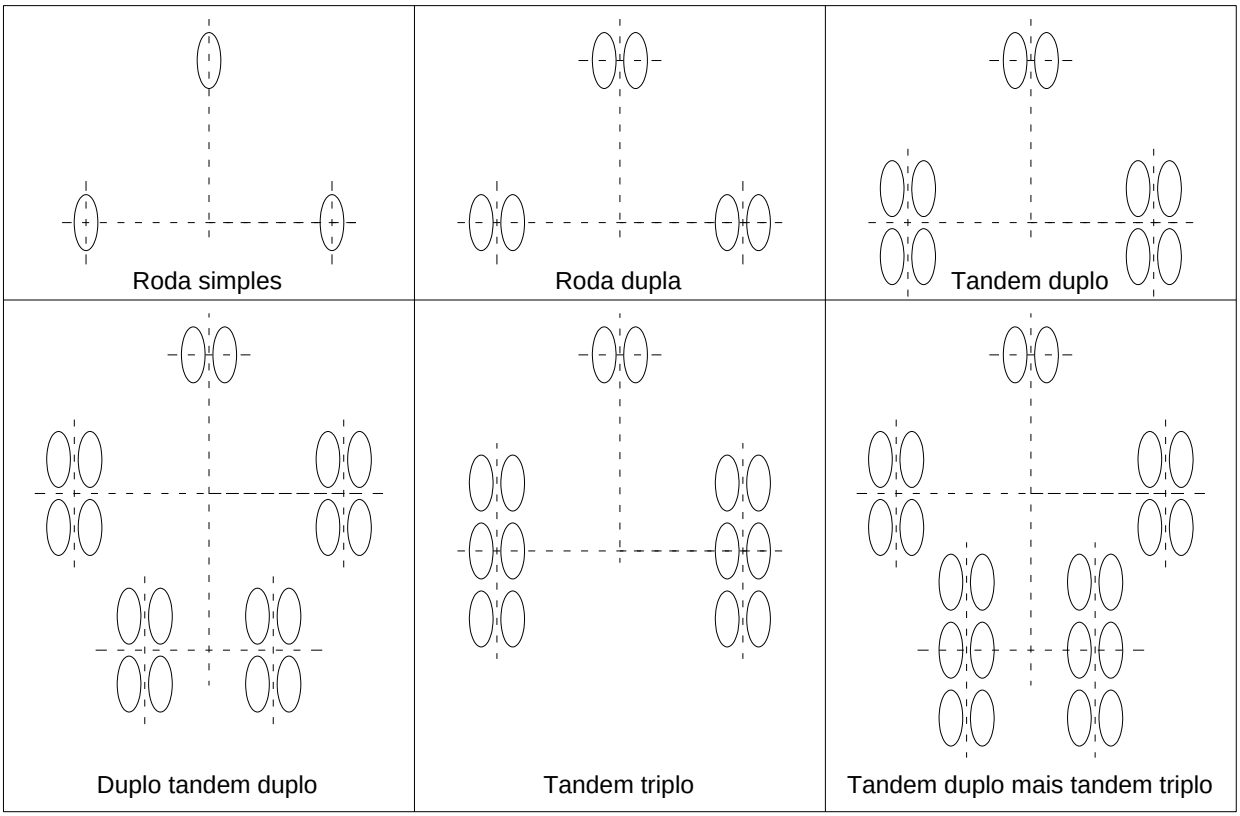


Figura 1 Configurações comuns de trem de pouso. Fonte: Adaptado de Horonjeff (2010)

Distância entre rodas, distância entre eixos, pressão recomendada para os pneus, área de contato entre o pneu e o pavimento e a carga suportado por roda são algumas características que cada fabricante de aeronaves deve fornecer. De acordo com Horonjeff (2010), a depender do número e da distribuição das cargas nas rodas, o impacto no pavimento pode ter uma magnitude considerável, que pode interferir no projeto de dimensionamento do pavimento. Utilizando critério comparativo, em pavimentos rodoviários geralmente a pressão dos pneus é da ordem de 0,8 MPa e a carga por roda é, aproximadamente, de 3 toneladas, enquanto para pavimentos aeroportuários, a pressão dos pneus das aeronaves é da ordem de 1,7 MPa e a carga por roda de 25 toneladas (AAA, 2017).

Para AAA (2017), cargas por roda mais elevadas exigem pavimentos mais espessos, assim como as pressões dos pneus mais elevadas. Portanto, os pavimentos aeroportuários são geralmente mais robustos e devem possuir material de qualidade adequada (efetiva resistência ao desgaste, por exemplo), pois as aeronaves são menos tolerantes com superfícies irregulares. No entanto, de acordo com Almeida *et al.* (2022), as aeronaves que possuem maior peso máximo de decolagem (PMD) não são as que mais contribuem para os maiores deslocamentos no topo do subleito principalmente devido ao fato da distribuição do peso pela quantidade de rodas presentes no trem de pouso. As variações nas configurações dos trens de pouso de aeronaves podem resultar em diferentes demandas sobre o pavimento durante as operações, mesmo quando a distribuição de peso por pneu é semelhante. De acordo com as pesquisas de Shabani & Zarei (2017) e Rezende (2018), que utilizaram análises de elementos finitos no *software* ABAQUS para estudar tensões verticais e horizontais em pavimentos rígidos e flexíveis com carga de aeronaves modelos Boeing 777-300R e Airbus 380-800, foi constatado que, para todos os tipos de pavimentos, as tensões observadas na aeronave B777-300R foram mais elevadas, indicando uma configuração e distribuição de carga mais favoráveis para o A380-800 nas situações analisadas.

3. MÉTODO

Para o desenvolvimento deste artigo foi definido o método: (i) determinação das aeronaves (foram utilizadas as informações de seis aeronaves, com pressão dos pneus variando de 1,193 MPa a 1,500 MPa e peso bruto entre 73.900 kg e 379.203 kg) a serem analisadas; (ii) definição da estrutura; (iii) cálculo das deflexões no topo do subleito embaixo das rodas com *software* AEMC, versão 2.4.2; e (iv) análise das informações obtidas. O resumo das etapas pode ser observado na Figura 2.

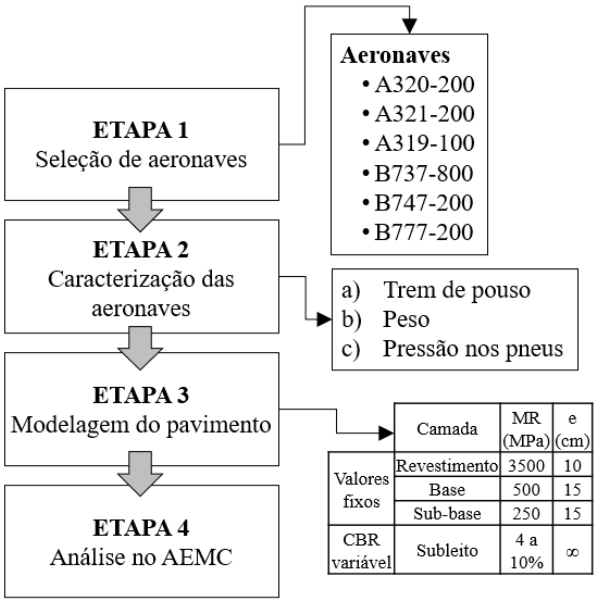


Figura 2 Etapas metodológicas

A análise ocorrerá por meio do valor de ε_z (deformação) no topo do subleito calculado em m/m e fornecido pelo AEMC. Os valores de ε_z serão relacionados em função do peso e pressão dos pneus das aeronaves e pela variação do CBR do subleito.

A Tabela 1 demonstra as informações físicas das aeronaves adotadas na análise possuindo como dados de entrada no AEMC o Peso Máximo de Decolagem (PMD), tipo de trem de pouso e pressão nos pneus.

Tabela 1 Características físicas das aeronaves

Aeronave	Peso bruto (PMD) (kg)	Pressão nos pneus (MPa)
A-320-200	73.900	1,379
A-321-200	93.900	1,500
A-319-100	64.400	1,193
B-737-800	70.307	1,358
B-777-200	248.120	1,255
B-747-200	379.203	1,310

As aeronaves A-320-200, A-321-200, A-319-100 e B-737-800 possuem trens de pouso do tipo roda dupla. As aeronaves B-777-200 e B-747-200 possuem trens de pouso do tipo tandem triplo e duplo, respectivamente. Como dado de entrada para o módulo de elasticidade do subleito no AEMC, utilizou-se a relação que o módulo de elasticidade é 10 vezes o valor do CBR (FAA, 2016).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base no objetivo deste trabalho, foi possível concluir que a análise realizada permitiu avaliar a influência das cargas de seis aeronaves distintas na variação das deformações no topo do subleito, considerando diferentes valores de CBR atribuídos às cargas geradas sob as rodas. Os resultados obtidos fornecem informações valiosas sobre como essas variáveis interagem e podem ser utilizados para melhor compreender o comportamento do pavimento em diferentes condições de carga e resistência do subleito. Essa análise contribui para o conhecimento na área de pavimentação e pode orientar decisões de projeto e manutenção para garantir a integridade das estruturas de pavimentos sob diferentes condições de tráfego aéreo.Com o aumento dos valores de $CBR_{subleito}$, todas as aeronaves possuíram uma tendência de redução das deformações no topo do subleito visto que, devido ao aumento do valor do CBR, é possível inferir que o solo se torna mais resistente, sendo, portanto, capaz de suportar maiores cargas sem sofrer deformações excessivas (Figura 3). Isso sugere que um subleito com um CBR mais elevado pode ser capaz de suportar as cargas mais elevadas de aeronaves com menor deformação, algo essencial para a integridade estrutural de uma pista de pouso e decolagem.

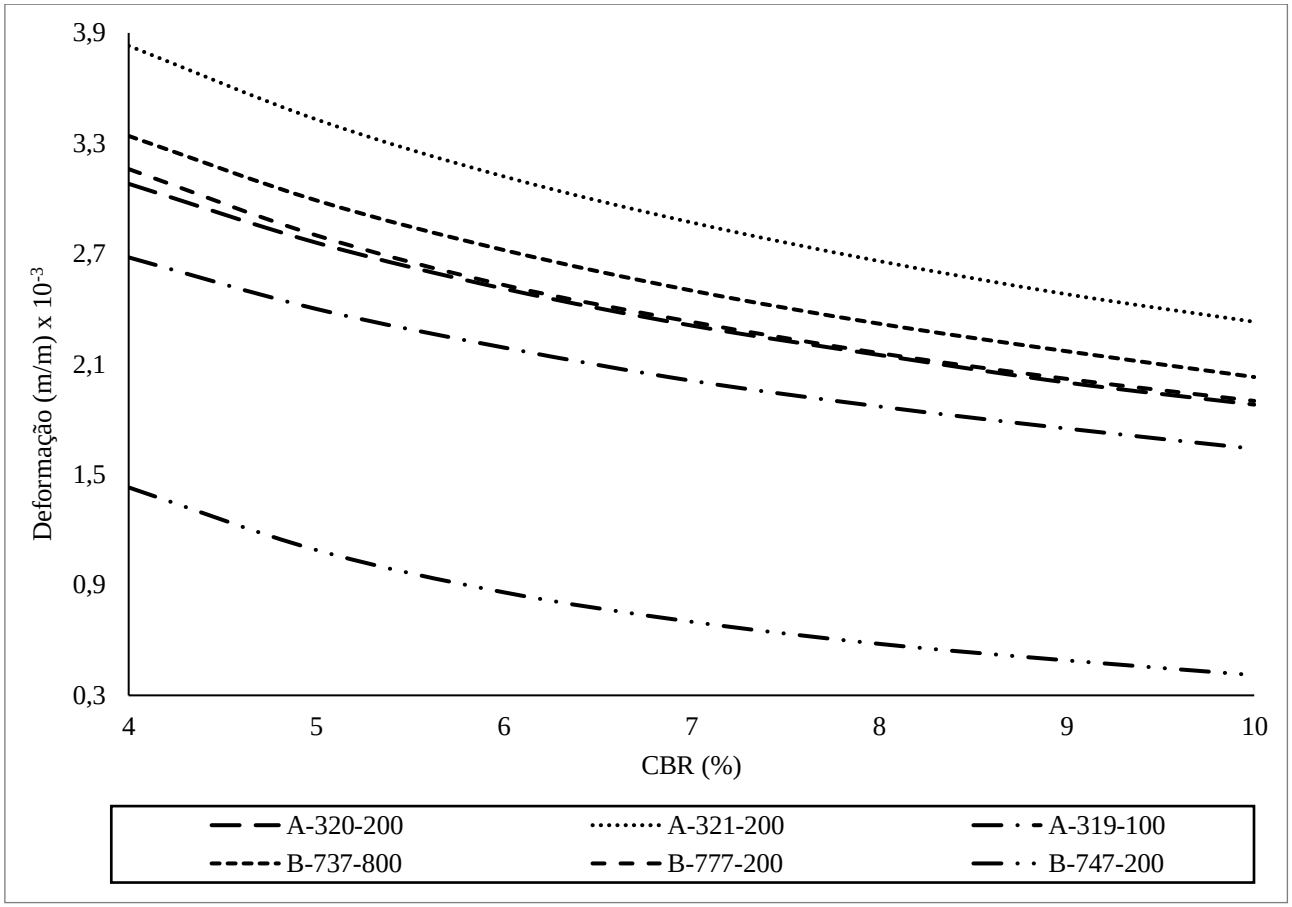


Figura 3 Deformação em função do CBR

Pode-se observar pela Figura 2 e pela Tabela 3 que os maiores valores foram obtidos da aeronave A-321-200 (PMD 93.900 kg), que possui o maior valor de pressão dos pneus (1,500 MPa). As menores deformações ocorreram para a aeronave B-747-200, com pressão dos pneus de 1,310 MPa e PMD de 379.203 kg.

Verificou-se que, para a aeronave do tipo A-321-200, que possui PMD equivalente a um quarto do peso da aeronave B747-200, o valor de deformação é superior em 14%. Essa diferença pode ser atribuída a alguns fatores:

(i) disposição do trem de pouso: a configuração do trem de pouso das aeronaves pode afetar como a carga é distribuída no solo. Uma distribuição mais concentrada (menos pneus no trem de pouso) pode resultar em concentração de carga em áreas específicas, sob as rodas, por exemplo, o que pode levar a maiores deformações no pavimento aeroportuário; e

(ii) a pressão dos pneus: essa característica pode variar e deve ser calculada levando em consideração a carga que a aeronave exerce sobre o pavimento. O uso de uma pressão de pneu inadequada pode levar a deformações excessivas.

Portanto, essa análise possui resultados importantes para o projeto e manutenção de pistas aeroportuárias, sobretudo as de pouso e decolagem, pois foi evidenciado que o CBR do subleito desempenha um papel fundamental na redução das deformações sob as cargas das aeronaves. Além disso, é importante em considerar não somente o PMD da aeronave, mas também a configuração do trem de pouso e a pressão dos pneus no projeto de dimensionamento de pistas de pouso e decolagem de modo a garantir a capacidade estrutural para o qual foi projetada, pois a pista deve receber diferentes tipos de aeronaves.

5. CONCLUSÃO

Com base no objetivo deste trabalho, a análise detalhada das cargas de seis tipos de aeronaves com diferentes configurações de trem de pouso e pressão dos pneus, juntamente

com a variação dos valores de CBR aplicados às cargas sob as rodas, forneceu parâmetros em relação ao comportamento do pavimento em condições diversas. Essa análise mostrou uma relação direta entre os valores do CBR do subleito e as deformações no topo do subleito sob ação da carga das aeronaves. O aumento dos valores do CBR do subleito resultou em uma melhoria significativa na capacidade do pavimento de resistir às cargas aplicadas pelas aeronaves. Esses resultados podem fornecer dados importantes para o projeto, construção e manutenção de pistas de pouso e decolagem, pois foi constatado que valores de CBR mais altos reduzem a deformação do pavimento, e, consequentemente, aumenta a confiabilidade estrutural do pavimento. Além disso, o estudo destacou a importância de considerar as especificações técnicas (pressão nos pneus e configuração do trem pouso) das aeronaves ao projetar pistas aeroportuárias.

6. REFERÊNCIAS

AAA. (2017). *Airfield Pavement Essentials Airport Practice Note 12*. *Australian Airports Association*. Australia.

Almeida, L. C.; Almeida, A. F. M.; Magalhães L. M.; Cava, F. H. E Oliveira, F. H. L. (2022). Análise das deformações nas camadas de pavimentos aeroportuários para diferentes configurações de trens de pouso. *Proceedings of the 2022 Air Transportation Symposium. São José dos Campos, Brazil: SBTA - Brazilian Air Transportation Research Society*.

FAA. (2016). AC 150/5320-6F. *Airport Pavement Design and Evaluations. Federal Aviation Administration.*

Horonjeff, R. (2010). *Planning and Design of Airports*. Fifth Edition.

Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design*. 2a ed. Ed. Pearson prentice.

Kim, Y. R. (2009). *Modeling of Asphalt Concrete.* American society of Civil Engineers.

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.

Tamagusko, T. B. (2020). *Airport pavement design.* Tese de Doutorado, University of Coimbra.

AVALIAÇÃO DA IRREGULARIDADE LONGITUDINAL DE PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS ATRAVÉS DO IRI E BBI

Livia Fortes Merighi, Aline Cacace, Fernando de Oliveira Fortes
CCR Aeroportos

*** Corresponding author e-mail address**: livia.merighi@grupoccr.com.br

PAPER ID: SIT 2268

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários através de índices utilizados para esta avaliação, tais como o *International Roughness Index* (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI) e as práticas adotadas pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO). A irregularidade longitudinal é parâmetro funcional responsável pelo conforto e qualidade ao rolamento, onde para aeroportos, durante as operações de pouso e decolagem a existência de possíveis desvios da superfície pode aumentar os níveis de tensão nos pneus podendo resultar em incidentes ou até acidentes. No Brasil este índice é preconizado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) através do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) constante no documento nº 153 através do parâmetro *International Roughness Index* (IRI). A Agência Americana responsável pelas atividades da Aviação Civil – *Federal Aviation Administration* (FAA), realiza o monitoramento deste levantamento através do *Boeing Bump Index* (BBI), índice também recomendado pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO). Desta forma, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo estatístico realizado em alguns aeroportos no Brasil comparando os resultados de IRI e BBI, analisando as vantagens e desvantagens de cada metodologia, assim como uma análise comparativa através de estudo de caso em pistas de pouso e decolagem.

Palavras-chave: Pavimento Aeroportuário, Irregularidade Longitudinal, *International Roughness Index* (IRI), *Boeing Bump Index* (BBI).

.

2. INTRODUÇÃO

A irregularidade longitudinal é parâmetro funcional do pavimento, onde para pistas aeroportuárias este índice pode incorrer em acidentes ou incidentes, assim como danos às aeronaves.

Nas operações de pouso e decolagem os pneus encontram-se em estado de tensão elevada onde a existência de possíveis desníveis na superfície podem contribuir com a fadiga nos componentes da aeronave, reduzindo ação de frenagem, podendo resultar em vibração excessiva na cabine dos pilotos, além de desconforto aos passageiros.

Para este tipo de levantamento o índice preconizado no Brasil é o *International Roughness Index* (IRI), enquanto nos Estados Unidos a FAA recomenda que este levantamento seja realizado através do *Boeing Bump Index* (BBI).

Vale ressaltar que a ICAO não recomenda o emprego do índice IRI em pistas aeroportuárias, orientando a avaliação de desvios, onde irregularidades isoladas na ordem de 2,5 cm a 3 cm em 45 metros de distância, são consideradas como aceitáveis.

Uma vez que alguns estudos abordam que o IRI não seria o índice mais adequado para levantamento de irregularidade em pavimentos aeroportuários, este trabalho teve como objetivo avaliar as metodologias de IRI e BBI de forma a cobrir a lacuna existente relacionada a este tema.

Desta forma, foi realizado um estudo de caso em alguns aeroportos no Brasil, considerando 8 perfis longitudinais com comprimento de pista superior a 2.000 m e 4 perfis com comprimento de pista superior a 1.500 m, garantindo uma amostragem significativa para esta análise comparativa.

Portanto, este estudo apresenta as vantagens e desvantagens de cada índice para caracterização da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários de forma a contribuir com a estratégia de Manutenção e Reabilitação (M&R) mais aderente a este modal.

3. IRREGULARIDADE LONGITUDINAL - IRI

A irregularidade longitudinal pode ser avaliada através de algumas metodologias em pavimentos aeroportuários, no Brasil a ANAC preconiza através do IRI, enquanto a FAA e ICAO recomendam o parâmetro BBI.

O IRI foi desenvolvido para o modal rodoviário na década de 80, onde esta metodologia quantifica os desvios da superfície na velocidade de 80 km/h simulando a passagem de um modelo "*quarter car*" (Figura 1). (Sousa, Carneiro e Oliveira, 2022).

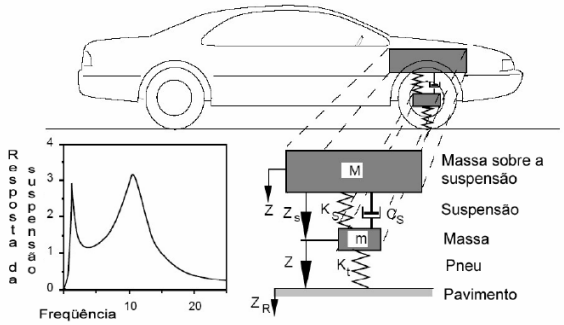


Figura 1: Modelo *Quarter-Car*.
Fonte: Sayers e Karamihas (1998) *apud* Barella (2008)

A irregularidade longitudinal medida através do IRI é normatizada pela ASTM E 867 (ASTM, 2020), onde a presença de valores elevados pode afetar a dinâmica dos veículos. (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Para o modal rodoviário, a irregularidade longitudinal está atrelada ao conforto e qualidade ao rolamento. Paterson (1987) *apud* Barella (2008), mencionam que quando presente, os desvios da superfície podem ocasionar em um aumento do custo operacional do veículo com manutenções, assim como aumento no consumo de combustível.

Em contrapartida, para o modal aeroportuário, a questão do conforto e qualidade ao rolamento não define o quesito irregularidade, ademais, é importante ressaltar que o tempo de exposição da irregularidade é diferente do modal rodoviário (FAA, 2009).

A ANAC para pavimentos aeroportuários, regulamenta o IRI no Brasil por intermédio do RBAC 153, o qual preconiza que não deve ultrapassar a 2,5 m/km apresentados a cada 200 m. Este parâmetro é

também utilizado em países como Itália, México e África do Sul como estratégia de M&R de pavimentos (Sousa, Carneiro e Oliveira, 2022; ANAC, 2023a).

O IRI deve ser levantado dependendo do *mix* das aeronaves que operam no aeroporto a 3 m e/ou 6 m do eixo (ANAC, 2023a).

A existência de irregularidade em pavimentos aeroportuários pode incorrer no aumento de fadiga dos componentes da aeronave, podendo resultar na redução da ação de frenagem, assim como em vibrações na cabine de controle, tornando difícil sua manipulação. (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Alguns estudos explicam que o levantamento da irregularidade em pistas de pouso e decolagem (PPD), realizada por intermédio do IRI, não seria ideal devido às configurações das aeronaves, assim como velocidades de operação (Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Para o modal rodoviário, os veículos são projetados para amortecer eventuais irregularidades, enquanto a suspensão das aeronaves deve amortecer a energia despendida durante as operações de pouso. (FAA, 2009; Sousa, Carneiro e Oliveira, 2021).

O comprimento de onda de uma irregularidade, assim como sua amplitude impactam de forma direta no desempenho da aeronave em pista, onde quando identificado comprimentos de onda longos, estes podem refletir em uma carga dinâmica no trem de pouso principal na ordem de 30% - 40%, enquanto quando identificado comprimentos de onda curtos, a aeronave pode sentir como um "choque de cargas" devido ao tempo para reação da suspenção mecânica do trem de pouso da aeronave (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Desta forma, a Boeing em 1968 estudou um índice que expressasse a operação das aeronaves de forma mais aderente a mecânica das aeronaves.

4. *BOEING BUMP INDEX* – BBI

O BBI surgiu com o intuito de verificar as reclamações da condição superficial da PPD pelos pilotos em *Addis Ababa,* localizada na Etiópia, na década de 60. (Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

Este método consiste em avaliar eventos isolados de irregularidades considerando aeronaves a jato carregadas operando em velocidades de 240 km/h-370 km/h (FAA, 2009).

A metodologia do *Boeing Bump Index* (BBI) tem como objetivo avaliar os comprimentos de onda de 0,5 m a 120 m, os quais contribuem com a resposta dinâmica das aeronaves, verificando o *"bump height"*, ou seja, desvios através de comprimento de onda *versus* amplitude (Figura 2). (FAA, 2009; Merighi, 2017; Merighi, Pereira e Schiavon, 2022).

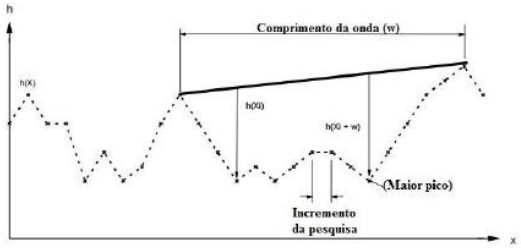


Figura 2: Método BBI. Fonte: Adaptado de FAA (2009) *apud* Merighi, Pereira e Schiavon (2022)

O BBI deve ser levantado no eixo, a 3,05 m e dependendo do código da aeronave que atua no aeroporto, também a 5,22 m do eixo, onde o limite deste índice pode ser classificado através da zona aceitável, zona excessiva, assim como zona inaceitável (Figura 3) (FAA,2009).

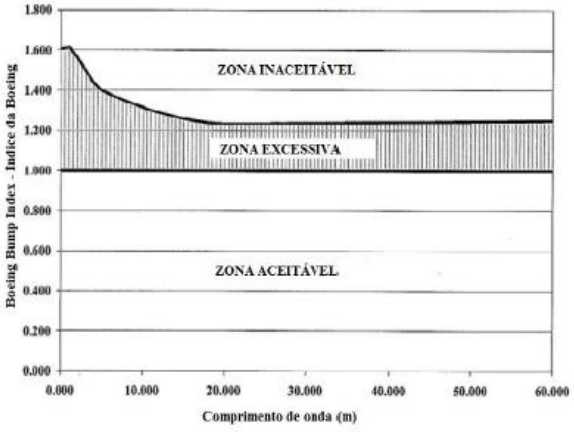


Figura 3: Classificação BBI. Fonte: Adaptado de Olidis (2013) *apud* Merighi, Pereira e Schiavon (2022)

Vale ressaltar que na classificação de zona aceitável, deve-se manter o monitoramento, enquanto para a zona excessiva deverá ser programado reparo. No caso de classificação inaceitável, poderá resultar no fechamento da pista.

Ambas as metodologias possuem algumas lacunas que foram abordadas neste estudo.

A FAA em (2021) realizou um estudo comparativo dos índices IRI e BBI, no qual resultou em valor do coeficiente de determinação (R^2) baixo, não sendo possível identificar uma correlação entre os parâmetros (Figura 4).

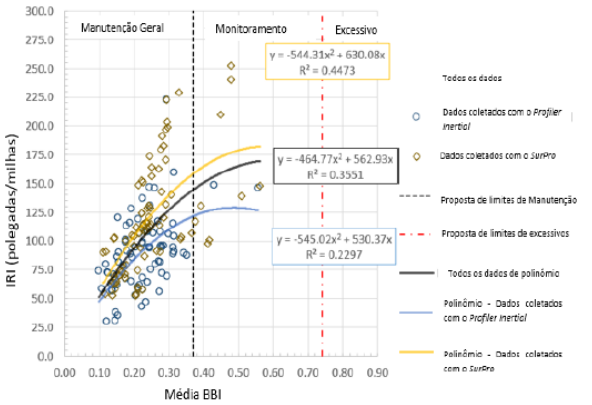


Figura 4: IRI X BBI. Fonte: Adaptado de FAA (2021) *apud* Merighi, Pereira e Schiavon (2022)

Durán e Fernandes Jr (2020) *apud* Sousa, Carneiro e Oliveira (2021) mencionam que o BBI poderia ser considerado como aproximadamente 10% do valor de IRI, onde desta forma, para que o BBI seja considerado excessivo, o resultado do IRI deve ser maior do que 10 m/km.

Ademais, para avaliação na PPD, onde as aeronaves operam com velocidades aproximadas de 185 km/h, comprimentos de onda equivalentes a 73 metros podem ser críticos para operação, enquanto para operações nas *taxiways* onde a velocidade da aeronave pode chegar a 37 km/h, comprimentos de 15 m poderiam impactar as operações (Souza, 2021).

5. IRREGULARIDADE - ICAO

O Anexo 14 da ICAO preconiza a avaliação da irregularidade, ou seja, os desvios da superfície, através de irregularidades aceitáveis em determinadas extensões.

A Tabela 1 apresenta as extensões permissíveis para os desvios de superfície.

	Extensão Irregularidade (m)								
Irregularidade Superficial (cm)	3	6	9	12	15	20	30	45	60
Irregularidade Superficial Vertical Aceitável	2.9	3.8	4.5	5	5.4	5.9	6.5	8.5	10
Irregularidade Superficial Vertical Tolerável	3.9	5.5	6.8	7.8	8.6	9.6	11	13.6	16
Irregularidade Superficial Vertical Excessiva	5.8	7.6	9.1	10	10.8	11.9	13.9	17	20

Tabela 1: Irregularidade ICAO
Fonte: ICAO (2022)

Caso a irregularidade seja denominada excessiva, deverá ser realizada manutenção imediata de forma a reestabelecer os parâmetros conforme condição original, onde esta região poderá oferecer riscos de danos estruturais.

Caso o limite de irregularidade temporário seja excedido, a ICAO orienta a programação de reparos.

6. MÉTODO DA PESQUISA

A irregularidade longitudinal foi avaliada pela metodologia do IRI e BBI em oito perfis longitudinais em pistas aeroportuárias com comprimentos superiores a 2.000 m e, quatro perfis longitudinais em pista com comprimento superior a 1500 m para este estudo.

Os perfis longitudinais foram classificados:

1) PPD L ≥ 2.000 m;
2) PPD L ≥ 1.500 m.

Vale ressaltar que o equipamento utilizado para este estudo foi contratado, estando devidamente calibrado e, homologado pela ANAC, atendendo aos parâmetros e critérios previstos pelo RBAC 153, prevendo a leitura de ao menos quatro linhas de medição de irregularidade para cada 3 m de pavimento (ANAC, 2023b).

De forma a se obter uma amostragem representativa, as pistas avaliadas são revestidas de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), onde alguns perfis levantados foram medidos em cabeceiras de pavimento rígido.

Foi realizada uma análise comparativa dos resultados dos levantamentos para verificação de correlação entre índices e necessidade de estratégia de M&R.

A seguir são apresentados os gráficos através das Figuras 5 a 7, permitindo uma verificação dos perfis longitudinais através dos parâmetros IRI e BBI considerando para esta avaliação os sensores de 3 m e 5,3 m.

Este estudo focou na avaliação destes índices considerando os impactos do trem de pouso principal, uma vez que representam 95% da carga da aeronave.

Ainda dentro desta análise, é importante considerar que a pista foi avaliada em terços conforme sua exposição e atuação de cargas, onde o primeiro terço e/ou o último em operações de pouso resultam em elevados impactos podendo resultar em uma degradação acelerada, e o segundo terço possui um grande impacto dos esforços de frenagem (Sousa, Carneiro e Oliveira, 2021).

Desta forma, foram avaliados os levantamentos considerando IRI ≤ 2,5 m/km e BBI ≤ 1,0. (ANAC, 2023a e FAA 2009).

Ainda que o BBI seja a avaliado em um intervalo de 0,25 m, para este estudo foi também considerada a média do BBI em 200 m (adimensional) de forma a se comparar com o IRI neste intervalo.

As Figuras 5 a 7 apresentam os resultados de IRI e BBI de forma anônima, considerando 4 perfis de levantamento para cada índice comparando suas respectivas leituras.

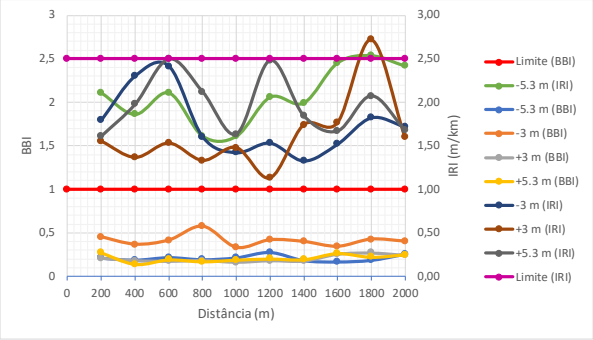


Figura 5: IRI x BBI L>2000 m
Fonte: Autores

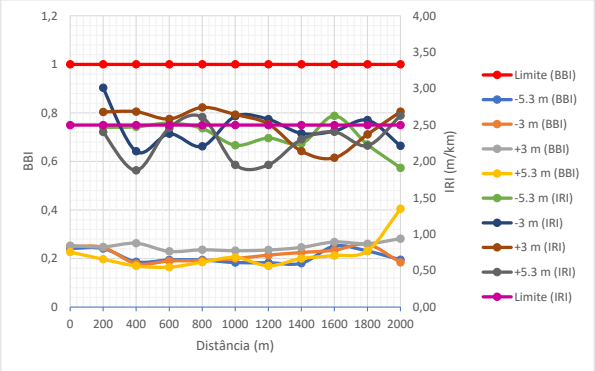


Figura 6: IRI x BBI L>2000 m
Fonte: Autores

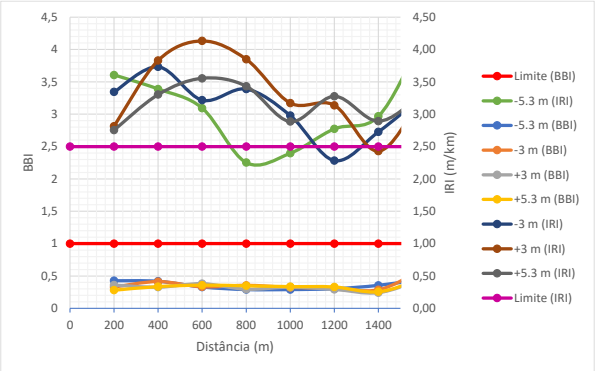


Figura 7: IRI x BBI L>1500m
Fonte: Autores

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

É possível observar nas Figuras 5 a 7 que o IRI, índice decorrente da somatória das irregularidades reflete em um índice mais conservador, enquanto o BBI, parâmetro desenvolvido pela fabricante de aeronaves, não resulta em valores críticos para estratégia de M&R.

Não foi possível uma análise conclusiva do terço com maior impacto de irregularidade, uma vez que alguns perfis apresentaram IRI significativos no primeiro e/ou último de acordo com a cabeceira predominante, enquanto em outras pistas, pode-se observar um IRI mais elevado no segundo terço de pista devido ao esforço de frenagem.

Taxas muito elevadas de IRI podem estar atreladas ao processo executivo e se agravarem durante a vida útil do pavimento de acordo com os esforços submetidos.

Vale ressaltar que o BBI avalia eventos isolados que são críticos durante as operações de pouso e decolagem, enquanto o IRI considera eventos sucessivos de irregularidade que estariam atrelados ao conforto e qualidade ao rolamento.

Ainda que mencionado anteriormente através do estudo de Durán e Fernandes Jr (2020) *apud* Sousa, Carneiro e Oliveira (2021), não foi possível observar uma correlação dos resultados de IRI e BBI, onde valores mais elevados de IRI resultaram em valores de BBI excessivos.

Observa-se que ainda que o IRI tenha apresentado resultados superiores a 2,5 m/km, o BBI não apontou resultados excessivos, não indicando necessidade para M&R.

8. CONCLUSÕES

A irregularidade longitudinal, é parâmetro funcional do pavimento, onde para pistas aeroportuárias este índice pode incorrer em acidentes ou incidentes, assim como danos às aeronaves.

Com base nos estudos realizados, é possível verificar a importância da adoção do parâmetro adequado para elaboração de plano de M&R, uma vez que para o modal aeroportuário, este índice não está atrelado ao conforto e qualidade ao rolamento e sim com a segurança operacional.

Desta forma, o IRI é um índice que foi desenvolvido para o modal rodoviário, o qual não considera o comprimento de onda crítico e tampouco suas amplitudes que podem causar danos as aeronaves.

Ademais, as velocidades de operação, assim como características do veículo devem ser consideradas na avaliação do índice de irregularidade longitudinal.

Vale ressaltar que a estratégia de manutenção de pavimentos aeroportuários deve considerar também os demais parâmetros funcionais e estruturais da pista, não sendo recomendada a consideração de um único índice para M&R.

Portanto, fica como recomendação a avaliação do índice BBI através de mais estudos, parâmetro que seria mais aderente ao modal aeroportuário, para elaboração da estratégia de M&R.

REFERÊNCIAS

ANAC (2023a). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil- Resolução nº153: Aeródromos- Operação, Manutenção e Resposta à Emergência*. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil.

ANAC (2023b). *Instrução Suplementar – IS 153.205-001 – Revisão C* Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil,

ASTM. (2020). *E 867-06 Standard terminology relating to vehicle-pavement systems. West Conshohocken: ASTM International.*

Barella, R. *Contribuição para avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros iniciais.* 2008. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-31032008-172407/pt-br.php. Acesso em 2023-09-17.

Durán, J. B. C. e 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. DOI: 10.14295/transportes.v28i1.1932

FAA (2009). *AC No:150/5380-9: Advisory Circular- Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness. Washington D.C: Federal Aviation Administration.*

FAA (2021). DOT/FAA/TC-21/32- *New Index Testing and Verification Runway Roughness Index. Washington: Federal Aviation Administration.*

ICAO (2022). *Annex 14 – Aerodromes – Volume I – Aerodrome Design and Operations – 9th Version -ISBN 978-92-9265-735-2.*

Merighi, L.F. (2017*) Avaliação funcional de Pavimentos 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).*

Merighi,L.F., Pereira,C.A.,Schiavon,J.A. (2022). *Avaliação da irregularidade longitudinal em pavimentos aeroportuários e pistas semi preparadas. Disponível em* < *https://www.sitraer.ita.br/sitraer2022/Proceedings/proceedings.html*> *Acesso em julho.23.*

Olidis, C. (2013). *Runway roughness considerations.* Acesso em 17 Set 2023. Disponível em < *https://captg.ca/docs/pdf/13presentations/SWIFT/Tues_PM_-_Runway_Roughness_-_Olidis.pdf*>. *Acesso em 16 Set 2023.*

Sayers M.W. Karamihas S.M. *The Little Book of Profiling. University of Michigan.1998.*

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.

Sousa, E.S., Carneiro,R.S.,Oliveira,F.H..L. (2022). *Verificação da relação IRI e BBI na avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos aeroportuários. Revista Transportes. DOI:10.14295/transportes.v30i1.2590.*

AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM EM CAMADA POROSA DE ATRITO

Jefferson de Sousa Facó, Rayssa de Sousa Carneiro, Francisco Heber Lacerda de Oliveira
Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: jefferson.faco@det.ufc.br

PAPER ID: SIT2250

RESUMO

A aderência pneu-pavimento em pistas aeroportuárias é uma característica relevante para a segurança operacional de pousos e decolagens. Por consequência, a avaliação da resistência à derrapagem conduz os operadores de aeródromos e a autoridade de aviação civil (Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC), dentre outros envolvidos, a realizarem levantamentos e atenderem à regulamentação brasileira vigente para aferir se o pavimento atende aos requisitos mínimos exigidos, bem como para avaliar a necessidade de intervenções de manutenção. Essa avaliação torna-se ainda mais necessária quando se trata de pistas de pouso e decolagem executadas em revestimentos asfálticos não convencionais (ou antiderrapantes) como é o caso daquelas em Camada Porosa de Atrito (CPA). Tendo esse cenário em vista, este trabalho tem o objetivo de avaliar se as condições de aderência pneu-pavimento em uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira dotada de CPA favorece a resistência à derrapagem. Foram analisados dados de um aeroporto brasileiro entre os meses de setembro de 2020 a agosto de 2023, os dados foram sistematizados para a obtenção do comportamento temporal da macrotextura. Realizou-se, também, análises estatisticas por meio de teste de hipótese e experimento ANOVA. A análise dos resultados, fundamentada nos requisitos de profundidade da macrotextura, medida pelo ensaio da mancha de areia, demonstrou que a PPD avaliada apresenta valores adequados, sendo 98,5% dos resultados médios classificados como “muito aberta”. Além disso, verificou-se que há uma tendência de crescimento dos valores de macrotextura e uma diferença estatisticamente significativa entre os terços da PPD. Desse modo, a CPA atende aos limites estabelecidos pala ANAC, confirmando sua adequabilidade em relação à garantia da segurança operacional de pouso e decolagem no pavimento aeroportuário estudado.

Keywords: Aeroporto, Macrotextura, Revestimento Drenante, Resistência à Derrapagem, Segurança Operacional.

1. INTRODUÇÃO

A aviação desempenha um papel fundamental no desenvolvimento dos países. Tal condição é evidenciada pelo aumento da demanda por transporte aéreo na última década (IATA, 2023). Tendo esse cenário de crescimento em vista, há uma necessidade de direcionamento dos esforços, por parte dos operadores aeroportuários e orgãos reguladores, para a garantia da segurança operacional das pistas de pouso e decolagem.

Nesse contexto, a aderência pneu-pavimento está relacionada à resistência à derrapagem e, consequentemente, à segurança operacional. Um dos principais parâmetros da aderência pneu-pavimento é a macrotextura, representada pela rugosidade visível do revestimento e que tem como principal funcionalidade permitir a drenagem eficiente das águas superficiais. Para melhorar a aderência pneu-pavimento, os operadores de aeródromos buscam diferentes soluções, sendo uma delas a execução de revestimento em Camada Porosa de Atrito (CPA).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é analisar se o desempenho da resistência à derrapagem de uma PPD de um aeroporto nacional, cujo revestimento é composto por CPA, é influenciado pela macrotextura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A principal causa das excursões ou derrapagens de aeronaves em PPD está relacionada às propriedades de aderência que afetam a eficácia dos sistemas de freio das aeronaves (ICAO, 2002). A aderência pneu-pavimento é composta por duas parcelas: coeficiente de atrito e macrotextura do revestimento.

A propriedade da profundidade de macrotextura torna-se mais importante à medida que a velocidade da aeronave aumenta (FAA, 1997; Kazda e Caves, 2000). Assim, operações de pouso e decolagem seguras dependem, entre outros fatores, de uma aderência pneu-pavimento adequada.

No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2023) estabelece valores mínimos para a macrotextura das PPDs. O operador de aeródromo deve monitorar a profundidade da macrotextura por meio de medições do ensaio tipo mancha de areia, fazendo medições em toda a extensão da PPD, em áreas localizadas a 3 m (três metros) do eixo da pista e de forma alternada a cada 100 m. ANAC (2020) determina a frequência mínima de medições de macrotextura, que depende da média de pousos na cabeceira predominante. Além disso, apresenta a classificação da macrotextura de acordo com a profundidade média encontrada (Tabela 1).

Tabela 1 Classificação da macrotextura (ANAC, 2020)

Profundidade (mm)	Classificação
$\leq 0,2$	Muito fechada
$0,2 < P \leq 0,4$	Fechada
$0,4 < P \leq 0,8$	Média
$0,8 < P \leq 1,2$	Aberta
$P > 1,2$	Muito aberta

Segundo Leocádio (2014), pavimentos novos possuem macrotextura aberta e microtextura rugosa, fornecendo melhores condições de atrito na presença de lâmina d'água. Por outro lado, pavimentos expostos a desgastes e com presença de contaminantes (acúmulo de borracha) podem ter maior tendência à ocorrência de acidentes, causada pela diminuição da histerese e da adesão. A histerese está relacionada a perda de energia da borracha, por meio de um processo de deforma do contato entra a superficie do pneu e o revestimento. A adesão diz respeito a interações a nivel molecular da borracha do pneu e o agregado existente no revestimento.

Rodrigues Filho (2006) analisou a aderência pneu-pavimento em uma PPD e verificou que em pavimentos com alto teor de contaminação por acúmulo de borracha a macrotextura apresenta redução. Sales (2019), por sua vez, realizou uma comparação entre as PPD de três revestimentos distintos e observou que a CPA apresentou melhor desempenho diante da remoção do acúmulo de borracha, tendo a profundidade da macrotextura apresentado aumento ao longo do tempo.

Ao analisarem o desempenho, ao longo de cinco anos, de revestimentos em trechos rodoviários experimentais nos Estados Unidos, McDaniel *et al.* (2010) observaram que o pavimento com revestimento em CPA

apresentou comportamento cíclico em relação aos resultados de macrotextura. Entretanto, não foram encontradas evidências estátiticas para inferir que houve mudança nos valores de profundidade de macrotextura entre o período de abertura da via ao tráfego até o final do período analisado.

Quariguasi *et al.* (2018) analisaram valores de coeficiente de atrito e macrotextura ao longo de um período de três anos em uma PPD com revestimento em CPA. Os autores, assim como McDaniel *et al.* (2010), observaram variações cíclicas nos valores de macrotextura e coeficiente de atrito, além de uma tendência de crescimento na profundidade de macrotextura a longo prazo. Contudo, os testes estatísticos realizados também não mostraram indícios suficientes para sustentar a hipótese de uma tendência de crescimento ou diminuição da profundidade de macrotetura.

A evolução dos índices da macrotextura e do coeficiente de atrito na PPD do Aeroporto Internacional de Fortaleza foi analisada por Brandão *et al.* (2015), entre os anos de 2011 e 2012. Os autores, ao dividirem a análise por terços, observaram uma variação da classificação da macrotextura ao longo do tempo, que passou de muito aberta para média no primeiro e segundo terços e de muito aberta para aberta no primeiro terço. Houve, então, uma redução nos valores da macrotextura após os serviços de recuperação asfáltica realizados.

Oliveira e Nobre Júnior (2009) avaliaram levantamentos de coeficiente de atrito e de macrotextura de Aeroporto de Fortaleza. Os autores constataram que o primeiro terço a partir da cabeceira predominante da PPD, se comparado aos demais terços, é deficiente no que diz respeito às características de macrotextura e de coeficiente de atrito. Uma possível causa para esse fenômeno é que o primeito terço concentra borracha impregnada sobre o revestimento, oriunda dos pneus das aeronaves durante os pousos. Nesse sentido, Chrispim (2022) também concluiu que o primeiro terço da PPD do Aeroporto Brigadeiro Firmino Ayres, em Patos no Rio grande do Norte possuía acumulo de borracha, convergindo para uma profundidade abaixo da recomendada pela ANAC.

Lugão (2008) conduziu uma análise do desempenho da macrotextura na PPD do Aeroporto de Confins, em Minas Gerais, com revestimento composto por CPA. O autor propôs uma classificação do nível de emborrachamento para PPD com revestimento em CPA, com base na profundidade de macrotextura, conforme Tabela 2.

Tabela 2 Nível de emborrachamento e profundidade de macrotextura em CPA (Lugão, 2008)

Profundidade (mm)	Classificação
< 1,2	Altamente emborrachada
1,2 > P ≤ 1,6	Emborrachada
1,6 > P ≤ 2,0	Levemente emborrachada
> 2,0	Praticamente sem borracha

3. MÉTODO DE PESQUISA

A PPD analisada pertence a um aeroporto brasileiro, com média de 160 pousos diários, no período de setembro de 2020 e agosto de 2023 e que possui 1.940 m de extensão e 45 m de largura. Além disso, possui a designição das cabeceiras de pista de 17 e 35, sendo a cabeceira 17 a predominante nas operações.

Em 2020, o revestimento, que possuía tratamento superficial (*grooving*) em toda sua extensão foi substituído por um revestimento em CPA ao longo de 1.760 metros de pista, enquanto os primeiros 120 metros da cabeceira 17 e os últimos 60 metros da cabeceira 35 possuem *grooving* no revestimento. Os trechos com *grooving* não foram analisados, tendo em vista que não é solicitado pela ANAC a aferição da macrotextura nesse tipo de revestimento; por esse mesmo motivo, também não foram avaliados dados anteriores à execução do revestimento em CPA, por não haver levantamentos de profundidade de macrotextura disponíveis para o revestimento anterior com *grooving*.

Os dados de macrotextura utilizados foram obtidos a partir de 66 relatórios técnicos fornecidos pela Superintendência de infraestrutura Aeroportuária da Agência Nacional de Aviação Civil (SIA/ANAC), obtidos dentro do período supracitado de setembro de 2020 a agosto de 2023.

As análises foram realizadas com auxílio do *software* Microsoft Excel. Os dados foram tabulados e sistematizados por meio da obtenção dos gráficos de comportamento temporal da profundidade de macrotextura, para toda a extensão da PPD e para seus terços.

Para avaliar o comportamento da macrotextura foram determinados intervalo de confiança das médias de cada terço de pista. Alem disso, realizou-se um teste de hipótese para avaliar a tendência de crescimento dos valores de profundidade de macrotextura e um teste de análise de variâncias (ANOVA) para determinar se há diferença significativa entre as médias dos valores de macrotextura para os diferentes terços de pista.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para verificar o comportamento global da macrotextura na PPD em estudo utilizou-se os dados indicados na Tabela 3, que contém os valores de profundidade da macrotextura média pelo ensaio da mancha de areia no período em questão. Os resultados também são apresentados na Figura 1.

Tabela 3 Valores médios de macrotextura da PPD

Medição	P (mm)	Medição	P (mm)
03/09/2020	1,32	11/03/2022	1,49
09/09/2020	1,26	25/03/2022	1,51
12/09/2020	1,33	09/04/2022	1,57
05/10/2020	1,28	20/04/2022	1,45
28/10/2020	1,53	09/05/2022	1,71
27/11/2020	1,36	24/05/2022	1,47
05/01/2021	1,34	09/06/2022	1,33
20/01/2021	1,46	28/06/2022	1,28
09/02/2021	1,31	10/07/2022	1,43
19/02/2021	1,37	28/07/2022	1,45
05/03/2021	1,26	12/08/2022	1,64
22/03/2021	1,41	01/09/2022	1,28
06/04/2021	1,31	17/09/2022	1,44
21/04/2021	1,45	02/10/2022	1,42
06/05/2021	1,19	07/11/2022	1,51
13/05/2021	1,27	26/11/2022	1,51
27/05/2021	1,55	07/12/2022	1,45
14/06/2021	1,43	25/12/2022	1,51
29/06/2021	1,29	09/01/2023	1,41
13/07/2021	1,29	25/01/2023	1,70
29/07/2021	1,30	09/02/2023	1,44
18/08/2021	1,27	23/02/2023	1,46
02/09/2021	1,41	15/03/2023	1,45
16/09/2021	1,43	30/03/2023	1,43
01/10/2021	1,53	14/04/2023	1,40
15/10/2021	1,45	30/04/2023	1,45
26/10/2021	1,36	14/05/2023	1,52
09/11/2021	1,33	29/05/2023	1,35
23/11/2021	1,33	13/06/2023	1,36
09/12/2021	1,45	25/06/2023	1,51
21/12/2021	1,57	13/07/2023	1,49
19/01/2022	1,42	28/07/2023	1,36
10/02/2022	1,48	15/08/2023	1,31

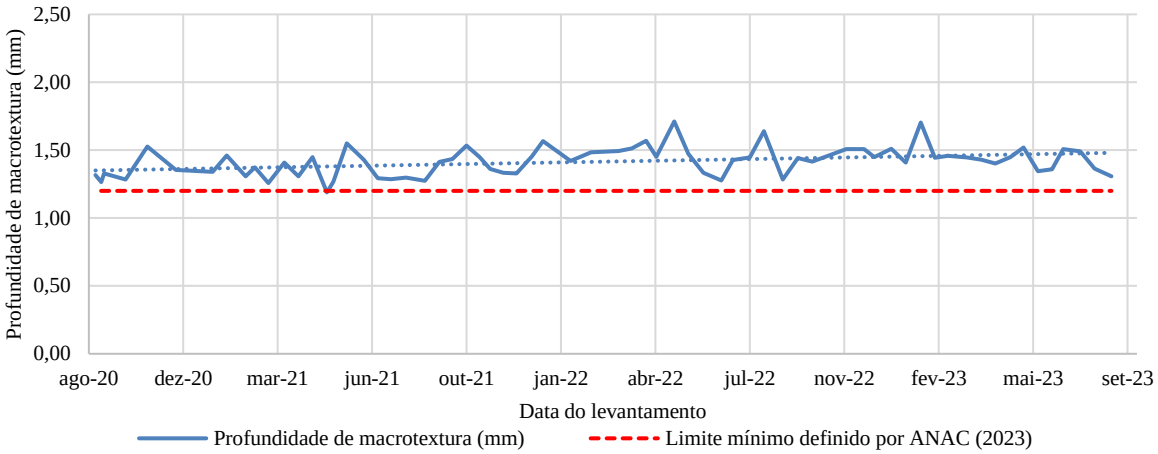


Figura 1 Evolução de macrotextura ao longo do tempo para a PPD avaliada

Observa-se, na Figura 1, que os resultados médios, com exceção de um levantamento em maio de 2021 (P=1,19 mm), apresentaram valores acima do nível mínimo exigido por ANAC (2023) (P=1,20 mm), e classificados como muito aberta (ANAC, 2020). Essa observação indica que a CPA é um revestimento que permite uma textura e uma drenabilidade superficial adequada, no quesito de resistência à derrapagem.

Percebe-se, ainda pela Figura 1, uma tendência de crescimento nos valores encontrados. Essa tendência está acompanhada de um comportamento cíclico, que pode estar associado às remoções de borracha na PPD. Vale destacar que, dada a quantidade de pousos diários do aeródromo, a frequência mínima de remoção do acúmulo de borracha é de 90 dias (ANAC, 2020).

Apesar de haver apenas um levantamento com resultado médio para a PPD abaixo do limite exigido, há segmentos isolados que possuem macrotextura menor que a indicada por ANAC (2023). Destacam-se os segmentos a 500m e a 1500m da cabeceira 17, como apresentados na Figura 2. O segmento a 500 m da cabeceira possui 48 levantamentos (72,7%) com classificação aberta e 6 levantamentos (9,1%) com classificação média. O segmento a 1500 m da cabeceira possui 43 levantamentos (65,2%) com classificação aberta e 1 levantamento (1,5%) com classificação média. Esses resultados isolados não influenciam a média geral de profundidade de macrotextura, mas podem indicar inadequação quanto à textura superficial nesses segmentos. Os menores valores de macrotextura nesses segmentos podem estar relacionados à presença da zona de toque das aeronaves nas operações de pouso, tanto para a cabeceira prediminante quanto para casos de pousos com cabeceira invertida, o que pode favorecer o acúmulo de borracha e o desgaste do revestimento.

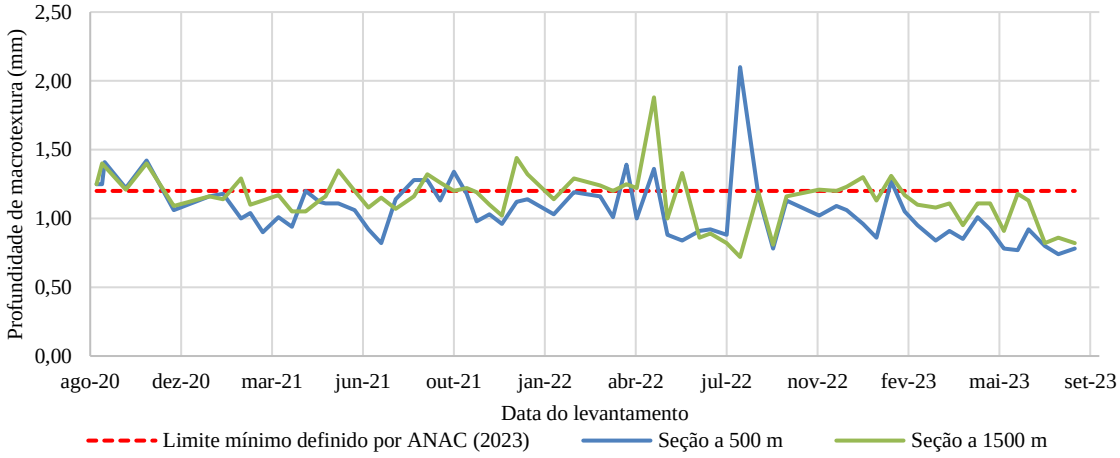


Figura 2 Macrotextura das seções a 500 m e 1500 m

Foi realizado um teste de hipótese para verificar se a média da profundidade de macrotextura até seis meses depois da execução do revestimento em CPA é menor que a média posterior a esse período. A hipótese nula é que as médias são iguais (H_0: $\mu_1 \geq \mu_2$), para um nível de significância de 5%, e a hipótese alternativa é que a média após os seis meses é superior (H_a: $\mu_1 < \mu_2$). O resultado obtido é de um valor-p de 1,43%, que é menor que o nível de significância adotado. Assim, existem diferenças estatisticamente significativas entre as duas médias e pode-se inferir que a média dos valores de macrotextura até seis meses imediatamente após a execução do revestimento em CPA é menor que a média posterior a esse período, indicando uma tendência de crescimento.

A Figura 3, por sua vez, apresenta os resultados médios de profundidade da macrotextura para cada terço da PPD.

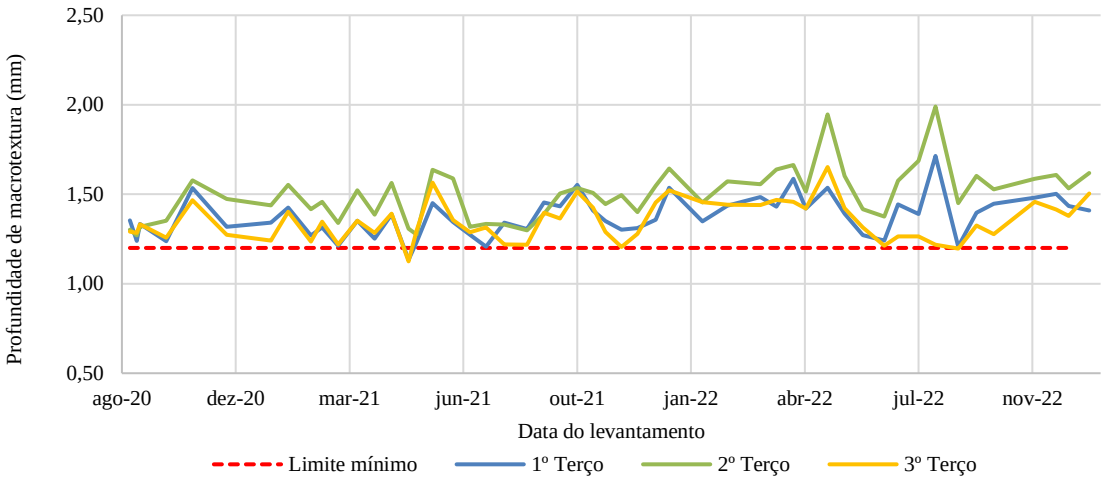


Figura 3 Evolução da macrotextura para cada terço da PPD

Observando-se a Figura 3, constata-se que o segundo terço apresentou os maiores valores médios de macrotextura. Isso pode ser explicado pelo fato de que é nesse trecho em que ocorre a desaceleração das aeronaves, não havendo grande acúmulo de borracha e maiores desgastes do revestimento. No primeiro e terceiro terços, por sua vez, nota-se que há valores médios menores de macrotextura. As menores médias podem estar associadas ao acúmulo de borracha decorrente das operações de pousos.

Há de se destacar, também, que o segundo terço não apresentou média de profundidade de macrotextura inferior a 1,20 mm (“muito aberta”) em nenhum levantamento. No entanto, o primeiro e terceiro terço apresentaram média inferior a 1,20 mm em um levantamento e em dois levantamentos, respectivamente. O levantamento em que ambos o primeiro e terceiro terços não atendem à profundidade de macrotextura mínima exigida é o mesmo levantamento para o qual a média para a PPD não foi atendida (06/05/2021).

No primeiro terço da PPD, trecho em que há a predominância de operações, os valores médios de macrotextura são maiores em comparação ao terceiro terço. Isso pode ser explicado pela adoção de estratégias de remoção de borracha mais frequentes no trecho em que há mais operações, visto que cada cabeceira pode ser avaliada de forma independente quanto ao procedimento de remoçao de borracha (ANAC, 2023).

Para comparação dos valores de macrotextura por terço, calculou-se o intervalo de confiança para a média, com nível de confiança de 95%, para cada um dos terços. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 Intervalo de confiança para os valores médios de macrotextura por terço da PPD

	Média Amostral (mm)	Desvio Padrão (mm)	Limite inferior (mm)	Limite Superior (mm)
1/3	1,38	0,110	1,35	1,41
2/3	1,50	0,147	1,49	1,56
3/3	1,35	0,105	1,32	1,37

Verifica-se uma diferença em relação aos valores médios esperados de macrotextura para cada terço, sobretudo em relação ao segundo terço, que apresenta valores superiores aos outros dois. Assim como na análise amostral, o primeiro terço apresenta intervalo de valores médios esperados para a macrotextura maior que para o terceiro terço.

Foi realizado, também, um teste de igualdade de médias para a profundidade de macrotextura por terço da PPD, por meio de uma análise de variâncias (ANOVA). A hipótese hula é de que as três médias são iguais, para um nível de significância de 5% (H_0: $\mu_1=\mu_2=\mu_3$), a hipótese alternativa testa se há diferença entre essas médias (H_0: $\mu_1\neq\mu_2\neq\mu_3$). Obteve-se um valor-p de $9{,}55\times10^{-5}$, que é menor que o nível de significância adotado. Isso sugere que há diferenças estatisticamente significativas entre a média de profundidade de macrotextura dos diferentes terços da PPD.

Tabela 5 Nível de acúmulo de borracha da PPD avaliada segundo classificação proposta por Lugão (2008)

Medição	P (mm)	Classificação	Medição	P (mm)	Classificação
03/09/2020	1,32	Emborrachada	11/03/2022	1,49	Emborrachada
09/09/2020	1,26	Emborrachada	25/03/2022	1,51	Emborrachada
12/09/2020	1,33	Emborrachada	09/04/2022	1,57	Emborrachada
05/10/2020	1,28	Emborrachada	20/04/2022	1,45	Emborrachada
28/10/2020	1,53	Emborrachada	09/05/2022	1,71	Levemente emborrachada
27/11/2020	1,36	Emborrachada	24/05/2022	1,47	Emborrachada
05/01/2021	1,34	Emborrachada	09/06/2022	1,33	Emborrachada
20/01/2021	1,46	Emborrachada	28/06/2022	1,28	Emborrachada
09/02/2021	1,31	Emborrachada	10/07/2022	1,43	Emborrachada
19/02/2021	1,37	Emborrachada	28/07/2022	1,45	Emborrachada
05/03/2021	1,26	Emborrachada	12/08/2022	1,64	Levemente emborrachada
22/03/2021	1,41	Emborrachada	01/09/2022	1,28	Emborrachada
06/04/2021	1,31	Emborrachada	17/09/2022	1,44	Emborrachada
21/04/2021	1,45	Emborrachada	02/10/2022	1,42	Emborrachada
06/05/2021	1,19	Altamente emborrachada	07/11/2022	1,51	Emborrachada
13/05/2021	1,27	Emborrachada	26/11/2022	1,51	Emborrachada
27/05/2021	1,55	Emborrachada	07/12/2022	1,45	Emborrachada
14/06/2021	1,43	Emborrachada	25/12/2022	1,51	Emborrachada
29/06/2021	1,29	Emborrachada	09/01/2023	1,41	Emborrachada
13/07/2021	1,29	Emborrachada	25/01/2023	1,70	Levemente emborrachada
29/07/2021	1,30	Emborrachada	09/02/2023	1,44	Emborrachada
18/08/2021	1,27	Emborrachada	23/02/2023	1,46	Emborrachada
02/09/2021	1,41	Emborrachada	15/03/2023	1,45	Emborrachada
16/09/2021	1,43	Emborrachada	30/03/2023	1,43	Emborrachada
01/10/2021	1,53	Emborrachada	14/04/2023	1,40	Emborrachada
15/10/2021	1,45	Emborrachada	30/04/2023	1,45	Emborrachada
26/10/2021	1,36	Emborrachada	14/05/2023	1,52	Emborrachada
09/11/2021	1,33	Emborrachada	29/05/2023	1,35	Emborrachada
23/11/2021	1,33	Emborrachada	13/06/2023	1,36	Emborrachada
09/12/2021	1,45	Emborrachada	25/06/2023	1,51	Emborrachada
21/12/2021	1,57	Emborrachada	13/07/2023	1,49	Emborrachada
19/01/2022	1,42	Emborrachada	28/07/2023	1,36	Emborrachada
10/02/2022	1,48	Emborrachada	15/08/2023	1,31	Emborrachada

A fim de observar as condições da pista em relação ao acúmulo de borracha do pavimento, realizou-se uma associação dos valores apresentados na Tabela 3 e a classificação proposta por Lugão (2008) (Tabela 2), como apresenta a Tabela 5. Constatou-se que a PPD apresentou 1 resultado classificado como altamente emborrachado (06/05/2021), 3 como levemente emborrachado (maio de 2022, agosto de 2022 e janeiro/2023) e 62 como emborrachado. No entanto, é necessário que o aeródromo siga a recomendação de frequência de remoção de borracha indicada por ANAC (2020) e mais análises devem ser realizadas para verificar se a adoção dessa classificação que indica acúmulo de borracha da PPD é válida para esse estudo de caso.

5. CONCLUSÕES

Constata-se, em relação à profundidade média de macrotextura da PPD, que a CPA proporcionou condições adequadas do ponto de vista da resistência à derrapagem das aeronaves durante pousos e decolagens. O parâmetro apresentou-se superior ao limite mínimo vigente, com uma tendência de crescimento estaticamente significativa ao longo do período analisado. Além disso, a maior parte das médias foram classificadas como muito aberta.

Embora a média da macrotexutra da PPD tenha se apresentado adequada, há segmentos com quantidade expressiva de levantamentos com valores de macrotextura abaixo do mínimo recomendado pela Autoridade de Aviação Civil brasileira, especialmente em trechos próximos à zona de toque das aeronaves. Além disso, quanto à análise da macrotextura por terços da pista, notou-se que as cabeceiras apresentaram os menores valores, possivelmente devido às operações de pousos. Esses resultados indicam a necessidade de considerar essas variações na macrotextura ao longo da extensão da PPD, de modo a planejar mais efetivamente as remoções de borracha ou, ainda, as atividades de manutenção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAC (2020). *Resolução nº 585, de 15 de setembro de 2020 – Aprova a Emenda nº 05 ao Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 153*. Agência Nacional de Aviação Civil. Brasília, DF.

ANAC (2023). *Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista pouso e decolagem. Instrução Suplementar – IS Nº 153.205-001. Revisão C.* Superintendência de Infraestrutura Aeroportuária. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.

Brandão, P. C; Vasconcelos Filho, R. K. A.; Oliveira, F. H. L.; Aguiar; M. F. P. (2015). Diagnóstico das condições de macrotextura e coeficiente de atrito no Aeroporto Internacional de Fortaleza. *Conexões - Ciência e Tecnologia*, v. 9, n. 1, junho de 2015. ISSN 2176-0144. doi:https://doi.org/10.21439/conexoes.v9i1.656.

Chrispim, M. G. O. (2022). *Análise da macrotextura do pavimento da pista de pouso e decolagem do aeroporto Brigadeiro Firmino Ayres – Patos, PB.* Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil.

FAA (1997). *Federal Aviation Administration. Measurement, Construction and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces. AC n.150/5320-12C.* US, Department of Transportation.

IATA. (2023, 06 de Fevereiro). *International Air Transport Association. Passenger Demand Recovery Continued in December 2022 & for the Full Year.* Acesso em 08 de julho de 2023, em: https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-02-06-02/#:~:text=Globally%2C%20full%20year%202022%20traffic,reached%206

2.2%25%20of%202019%20levels.
ICAO (2002). *Manual de servicios de aeropuertos. Parte 2. Estado de la superficie de los pavimentos.* Cuarta edición. Organización de Aviación Civil Internacional. Lima, Peru.
Kazda, A. & Caves, R. E. (2000). *Airport Design and Operation.* Ed. Pergamon. New York.
Leocádio, A.S. (2014). *Avaliação da pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Manaus/Eduardo Gomes*. Dissertação. Universidade Federal do Amazonas.
Lugão, W. G. (2008). *Análise da aderência entre pneu e pavimento com Camada Porosa de Atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
McDaniel, R. S., Kowalski, K. J., Shah, A., Olek, J. E Bernhard, R. J. (2010). *Long-term performance of a Porous Friction Course*. Publication No HWA/IN/JTRP-2009/22, SPR-2939. Indiana, EUA.
Quariguasi, J. B. F.; Almeida, L. C.; Oliveira, F. H. L. (2018). Análise da aderência pneu-pavimento aeroportuário em revestimento de camada porosa de atrito. *Anais do 32° Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET*. Gramado, Rio Grande do Sul, 2018.
Oliveira, F. H. L. & Nobre Júnior, E. F. (2009) Considerações sobre a macrotextura e o atrito na avaliação funcional de pavimentos aeroportuários. In: *IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço*. Outubro de 2009. Fortaleza/CE.
Rodrigues Filho, O. S. (2006). *Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários –Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo Congonhas*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica –USP, São Paulo.
Sales, R. S. (2019). *Análise do processo de remoção de borracha em revestimentos aeroportuários: influência na aderência pneu-pavimento*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil.

AVALIAÇÃO DE COEFICIENTE DE ATRITO EM PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM POR MEIO DE IMAGENS AÉREAS E REDES NEURAIS CONVOLUCIONAIS

Tiago Silveira de Andrade Aquino, Francisco Heber Lacerda de Oliveira, Gustavo Antonio Sousa Paz e Mota e César Lincoln C. Mattos
Universidade Federal do Ceará

*** Corresponding author e-mail address:** tiago.silveira@det.ufc.br, heber@det.ufc.br, gustavomotaff@gmail.com, cesarlincoln@dc.ufc.br

PAPER ID: SIT2213

ABSTRACT

Excursion incidents pose a significant concern for the aviation sector as they account for most accidents on runways. Accurately predicting tire-pavement friction during landing is crucial to ensure safe operations and prevent runway excursions. However, traditional methods and mathematical models used for measuring skid resistance parameters rely on specialized equipment and expertise, resulting in substantial runway closure time. To address this, the study explores the potential of leveraging pattern recognition and image processing technologies, coupled with the availability of high-resolution and periodic satellite images, to infer tire-pavement friction conditions on runways. This research specifically investigates the determination of the coefficient of friction on runways using aerial images. Two methodologies are compared: one utilizes Convolutional Neural Networks (CNN), while the other utilizes image color composition characteristics (RGB-HSV). The aim is to establish a correlation between these methodologies and coefficient of friction data, enabling the prediction of this physical parameter based on the image data. Data from a Brazilian runway spanning the period of 2015 to 2020, along with aerial satellite images from the same timeframe sourced from the Google Earth Pro platform, are employed. The evaluation reveals promising results, with both techniques achieving a mean squared error of less than 0.01. The absolute errors are in the range of 0.1 for the RGB-HSV technique and 0.08 for the CNN technique. These findings highlight the potential of using aerial images and advanced image analysis techniques to accurately estimate tire-pavement friction conditions on runways, providing valuable insights for enhanced safety measures and decision-making in aviation operations.

Keywords: skid resistance, pavement, airport, digital image processing.

INTRODUÇÃO

As pistas de pousos e decolagens (PPD) são pavimentos que exigem cuidadosa manutenção e monitoramento para manter a segurança das operações. Situações críticas como pouso em pista molhada exigem que as condições do pavimento proporcionem a realização da operação de maneira segura, garantindo o controle direcional da aeronave e evitando excursões de pista.

O monitoramento da aderência pneu-pavimento envolve acompanhamento e medições periódicas de parâmetros de segurança, como coeficiente de atrito e macrotextura, especificadas pela ANAC (2020, 2021). O regulamento nacional é baseado em normativas internacionais (FAA, 1997; ICAO, 2002) e descreve os mesmos critérios de monitoramento, avaliação e intervenções.

FAA (2005) estabelece que a frequência de medição de atrito de uma PPD está correlacionada com o número médio de operações diárias de aeronaves de motor a reação (*turbojet aircrafts*). Apesar de ANAC (2021) indicar a possibilidade de inspeção manual, FAA (2005) relata que pesquisas demonstraram que inspeção visual da aderência de pavimentos não são confiáveis.

Para o monitoramento do coeficiente de atrito, ANAC (2021) estabelece os equipamentos habilitados, os valores de coeficiente de atrito de manutenção e mínimo absoluto. Apesar da diversidade de equipamentos todos eles realizam medição direta e dispendem tempo e recursos para a execução das campanhas de medição, bem como o bloqueio temporário da PPD.

De forma ampla, diversas investigações vêm sendo conduzidas com o intuito de estabelecer vínculos entre a textura da superfície do pavimento e sua capacidade de resistência à derrapagem. No entanto, a maioria desses modelos apresenta aplicabilidade restrita, uma vez que os parâmetros podem variar conforme o procedimento de teste, níveis técnicos, materiais e fatores ambientais (ZUNIGA-GARCIA; PROZZI, 2019).

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) e suas imagens vêm sendo utilizados em pesquisas e procedimentos de apoio à estruturas aeroportuárias (AKBAR *et al.*, 2019; GRADOLEWSKI *et al.*, 2021; PARKER *et al.*, 2022).

Os usos de aprendizagem de máquina por meio de redes neurais e outras técnicas para classificação de imagens e reconhecimento de padrões estão presentes desde a detecção de defeitos em ferrovias (SHANG *et al.*, 2018), reconhecimento de resíduos e rejeitos (GUO *et al.*, 2021) até aplicações médicas (BOYADZHIEV *et al.*, 2022). O avanço em pesquisas de avaliação de condições de pavimento com o uso de Redes Neurais Artificiais é relatado por Quariguasi *et al.* (2021), o uso de imagens para a determinação da macrotextura do pavimento (AMARASIRI *et al.*, 2012; AQUINO *et al.*, 2022; ARAÚJO, 2017; GHADERI; ABEDINI, 2021), e exemplos do uso de Redes Neurais Convolucionais (RNC) para a identificação de defeitos de pavimentos, como relatado por Shang *et al.* (2018), e para a determinação macrotextura.

Hafemann *et al.* (2015) demonstraram o potencial do uso de métodos de aprendizado de máquina para classificação de texturas usando RNC. O método envolve treinar uma RNC em um conjunto de dados de origem, projetar os dados de um conjunto de dados de destino em um espaço de características diferente e treinar um classificador nessa nova representação. Experimentos mostram que essa abordagem obtém resultados adequados em conjuntos de dados pequenos, aproveitando o conhecimento de conjuntos de dados maiores. No conjunto de dados Brodatz-32 de Hafemann *et al.* (2015) o método alcançou uma precisão de 97,04%, superando descritores populares de texturas. A análise visual mostra que os dados projetados se agrupam por classe, indicando relevância das características aprendidas pela RNC. O mesmo estudo também compara diferentes estratégias de extração de *patches*, sendo a abordagem mais simples com desempenho de 96,35% e a de *patches* aleatórios exigindo maior poder computacional.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar metodologia de aprendizagem de máquina que fosse capaz de estimar o coeficiente de atrito de uma PPD por meio de imagens de satélite, comparando duas

metodologias: uma que utilizou as imagens correlacionando-as com os coeficientes de atrito por meio de RNC e outra que utilizou redes neurais para correlacionar os coeficientes de atrito com conjunto de características de coloração das imagens (sistema RGB e HSV). A Figura 1 apresenta as etapas do trabalho resumidas por meio de um fluxograma metodológico.

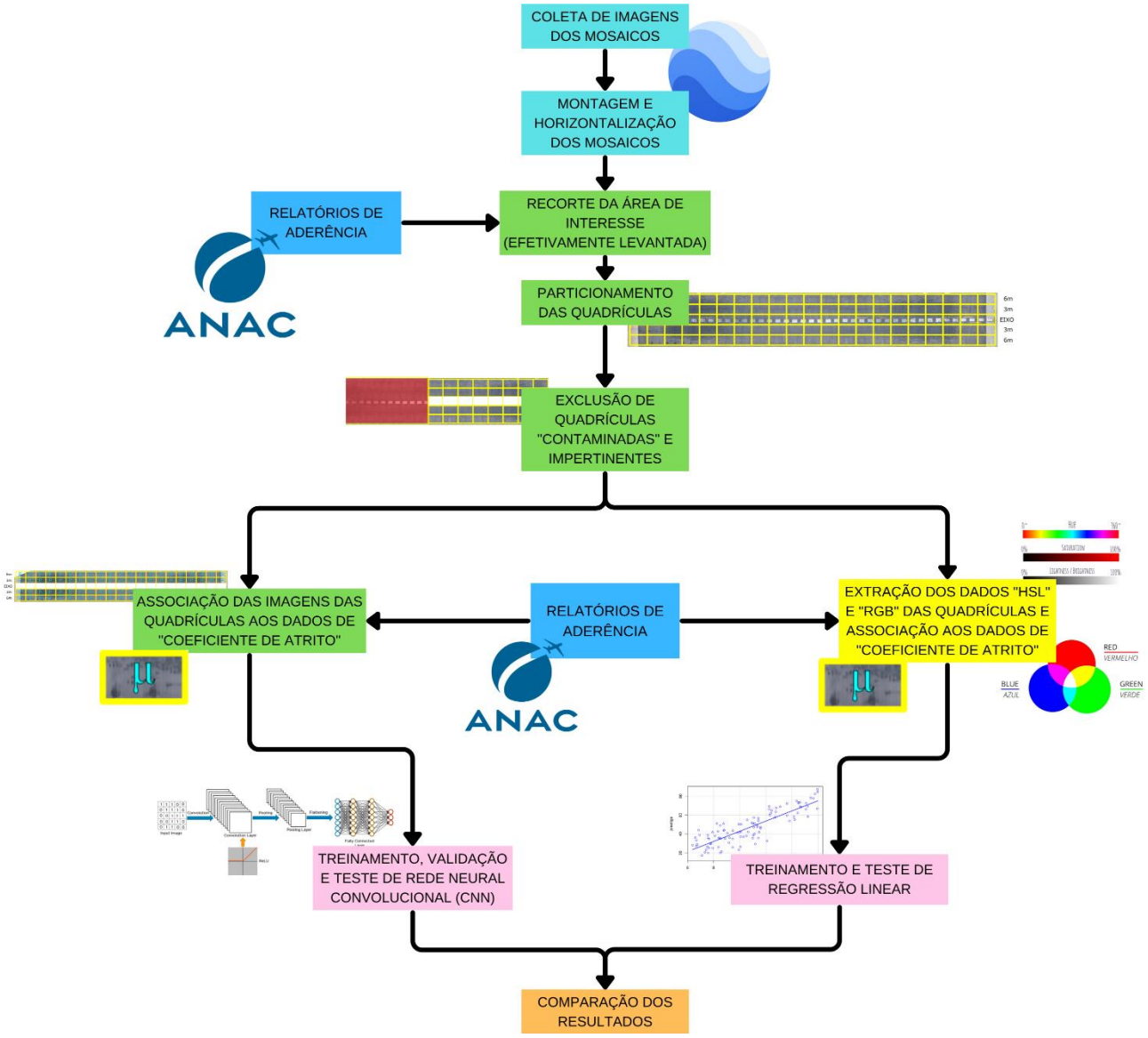


Figura 1: Fluxograma da metodologia da pesquisa

MÉTODO DE PESQUISA

Para o presente trabalho foi utilizado como objeto de estudo uma pista de pouso e decolagem (PPD) brasileira, com cabeceiras 10 e 28, extensão total de 3.000 m e largura útil de 45 m. A PPD possui revestimento em pavimento flexível e apresenta *grooving* no trecho inicial de 700 m a partir de 100 m da cabeceira 10.

Para a coleta das imagens foi utilizado o banco de dados do *software Google Earth PRO* Versão 7.3.6.9345 (64-bit) e o seu histórico de imagens. Foram coletadas imagens de 17 datas (entre os meses de junho de 2015 e abril de 2020) com os respectivos dados de coeficiente de atrito medidos na PPD de estudo e extraídos de relatórios técnicos de avaliação de aderência fornecidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). A Figura 2 apresenta um histograma da distribuição de frequência absoluta dos dados de coeficiente de atrito da PPD estudada nas datas selecionadas entre os anos de 2015 e 2020.

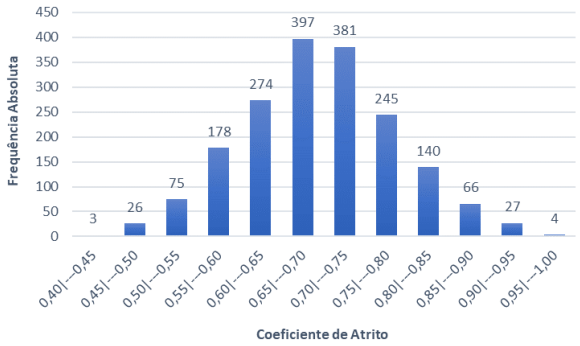


Figura 2: Distribuição de frequência acumulada dos coeficientes de atrito nas datas selecionadas para a pesquisa.

Buscando incrementar a base de dados de imagens cujas informações de coeficiente de atrito e macrotextura estavam disponíveis nos relatórios, realizou-se uma busca manual por meio da ferramenta "imagens históricas" disponíveis na base de dados do *Google Earth PRO*. Formou-se banco de dados de imagens da PPD apenas imagens cuja data de captura informada no programa estava compreendida em um intervalo de até 20 (vinte) dias antes ou depois da captura dos dados de coeficiente de atrito. O Quadro 1 apresenta as datas de coleta em campo dos coeficientes de atrito e as respectivas datas da captura das imagens pelo satélite, informadas por meio do *Google Earth PRO*.

Quadro 1: Datas de coleta de coeficiente de atrito e respectivas datas de captura das imagens de satélite

Coleta Coef. de Atrito	Imagem de Satélite	Coleta Coef. de Atrito	Imagem de Satélite
30/06/2015	19/06/2015	27/12/2017	31/12/2017
30/07/2015	03/08/2015	23/02/2018	19/02/2018
29/10/2015	19/10/2015	10/07/2018	02/08/2018
27/12/2015	13/12/2015	25/08/2018	21/08/2018
08/02/2016	06/02/2016	23/01/2019	24/01/2019
09/03/2016	12/03/2016	22/03/2019	17/03/2019
28/04/2016	08/05/2016	11/12/2019	29/11/2019
08/05/2017	10/05/2017	08/03/2020	03/04/2020
10/09/2017	11/09/2017	-	-

Foram excluídas regiões que apresentavam interferência da imagem da pista provocada por sombras, nuvens ou outros objetos que obstruíssem o pavimento. A Figura 3 apresenta os trechos das imagens que foram desconsiderados em cada data.

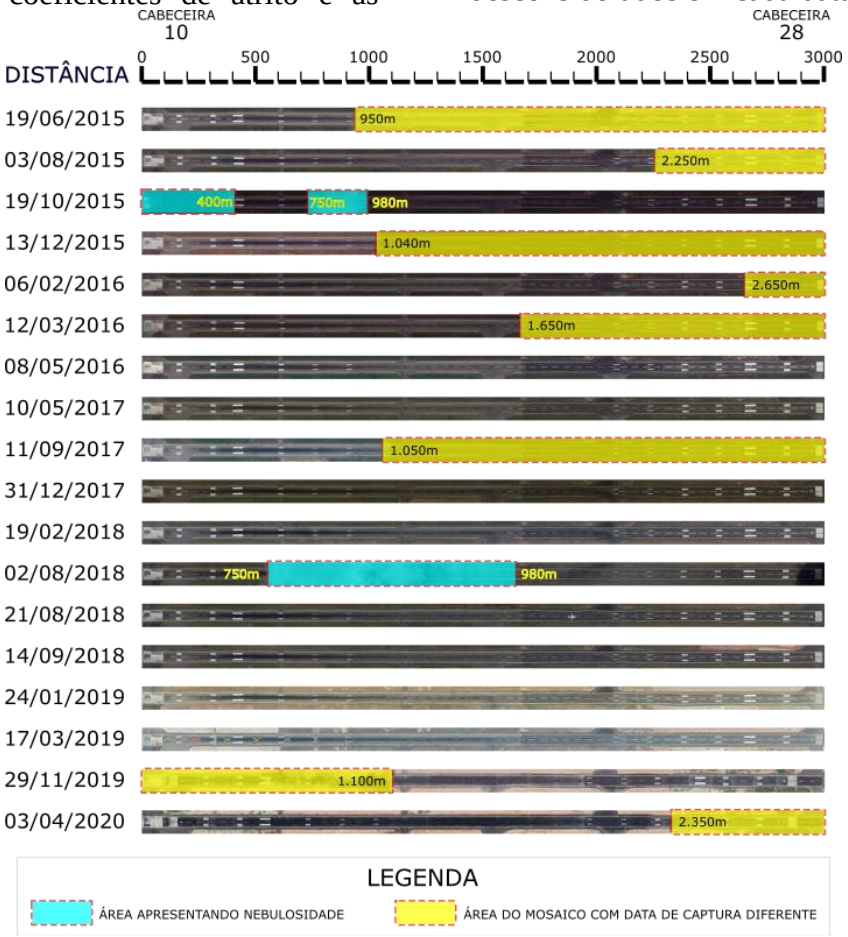


Figura 3: Imagens utilizadas na análise coletadas entre 19/06/2015 e 03/04/2020

Por apresentar resolução adaptativa, recurso no qual a imagem apresenta uma maior resolução à medida que o usuário aproxima o *zoom* à região de interesse, foram salvos *frames* de trechos das PPD de tal forma que o seu conjunto compusesse um mosaico da pista completa em sua máxima resolução disponibilizada na plataforma. O mosaico foi construído utilizando o editor de imagem *GIMP* versão 2.10.34, e, na mesma ferramenta o mosaico foi rotacionado, alinhando o sentido longitudinal da pista com a posição horizontal, e recortado, eliminando as regiões externas às marcações de bordo da PPD.

Tendo em vista que as medições de coeficiente de atrito são realizadas à uma distância de 3 m e 6 m para cada lado do eixo da PPD, e a medição de macrotextura é realizada a uma distância de 3 m do eixo da PPD, as imagens foram novamente recortadas, utilizando automação por *script*, de acordo com os limites laterais apresentados na Figura 4, totalizando uma figura de 15 m.

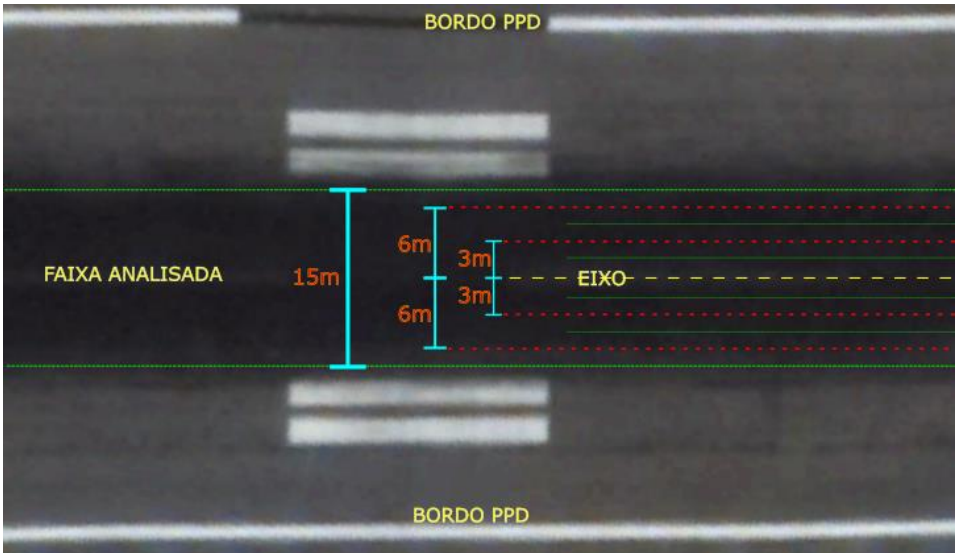


Figura 4: Representação da faixa das imagens da PPD analisada

1. Modelo de previsão utilizando redes neurais convolucionais (RNC)

De posse das imagens rotuladas de acordo com seu coeficiente de atrito, um modelo de RNC foi implementado para estimar um coeficiente para uma imagem de entrada. O modelo foi alimentado por um banco de dados previamente construído. Para a montagem do algoritmo do modelo e seu treinamento, utiliza-se a biblioteca de código aberto *TensorFlow* (ABADI *et al.*, 2015), que é uma biblioteca que utiliza grafos de fluxo de dados para a computação numérica. De acordo com dos Anjos (2019) essa biblioteca foi desenvolvida pelo *Google* com a finalidade de realizar pesquisas sobre redes neurais profundas e aprendizagem de máquina. Os dados neste *framework* são representados como tensores que são *arrays* ou listas com "N" dimensões. Sob o *framework* do *TensorFlow* utilizou-se o Keras (KERAS, [*s. d.*]), uma API de redes neurais de alto nível que facilita a manipulação do modelo com simples comandos para configuração dos parâmetros de processamento.

As etapas a seguir consistiam em separar os dados nos grupos de treinamento, validação e teste. Para este experimento utilizou-se a seguinte divisão: 80% das amostras para o grupo de treinamento, 10% para etapa de validação e 10% para etapa de teste. Durante a etapa de treinamento, o modelo foi ajustado para que o algoritmo pudesse aprender as características das imagens para estimar um valor de coeficiente de atrito, com base nos dados conhecidos. Na etapa de validação, o modelo estima os coeficientes de atrito com o respectivo conjunto de dados dessa etapa e sua análise contribui para ajuste dos seus hiperparâmetros.

Dentre os hiperparâmetros do modelo, o problema a ser resolvido foi definido como uma questão de regressão, na qual a camada de convolução possui 32 neurônios com a função

ativação *ReLU*, e camada de saída com 32 neurônios e função de ativação identidade.

Aplicou-se, ainda, um processo de normalização nas imagens, dividindo os valores das intensidades RGB de cada pixel por 255 em cada um dos 3 respectivos canais de cores. Essa etapa permitiu uma melhor avaliação dos resultados, bem como um menor esforço computacional.

2. Modelo de previsão utilizando características dos sistemas de cores (RGB -HSV)

Em paralelo, foi implementado um modelo de regressão linear para treinamento e predição. As amostras (quadrículas) foram processadas por meio de um método de extração de características relacionadas às cores apresentadas. Essa extração retorna um vetor de números reais que descreve as características das amostras de modo que permite a modelagem por meio de regressão linear.

Para cada quadrícula, as médias e os desvios padrão do conjunto de *pixels* de cada canal são calculadas. Assim, são obtidas as médias para as intensidades do canal vermelho (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*), seguidas dos respectivos desvios padrão. Em seguida, os respectivos cálculos são realizados para as amostras após convertidas ao padrão HSV. Nesse padrão, a cor de cada *pixel* é composta pela combinação da intensidade dos parâmetros de matiz (*hue*), saturação (*saturation*) e valor (*value*). Assim, cada amostra é processada resultando em um vetor unidimensional com 12 valores.

Os recursos utilizados para a representação das amostras em RGB, HSV e a extração das características das amostras estão contidos nas bibliotecas *OpenCV* e *Scikit-Learn* (PEDREGOSA *et al.*, 2011) e os valores variam de 0 a 255 para o R (*Red*), G (*Green*), B (*Blue*), S (*Saturation*) e V (*Value*), e varia de 0 a 179 para o H (*Hue*).

A Tabela 1 apresenta o resumo com as médias das médias e desvio padrão dos parâmetros dos sistemas de cores RGB e HSV das 1.376 quadrículas de amostras. Observa-se que pelos dois sistemas uma coloração acinzentada representa o conjunto de imagens, e há pouca variedade dessa coloração tendo em vista o baixo desvio padrão encontrado.

Assim como na metodologia utilizando RNC, os dados de treino e teste foram normalizados. A normalização dos dados foi implementada por meio de método contido no pacote de códigos Python *Scikit-Learn*, que utiliza a técnica *Z-Score*. A regressão linear foi implementada dividindo o conjunto inicial em 65% para treino e 35% teste.

Tabela 1: Médias das médias e dos desvios padrão dos parâmetros dos sistemas de cores RGB e HSV das amostras

	BLUE	GREEN	RED	HUE	SATURATION	VALUE
MÉDIA DAS MÉDIAS	67,48	63,01	66,11	103,10	42,40	70,84
MÉDIA DO DESVIO PADRÃO	4,80	4,68	4,80	16,59	9,45	4,82

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 5 apresenta o gráfico de perda para os conjuntos de treino e validação ao longo do treinamento do modelo de RNC utilizando 100 épocas. A Figura 6 apresenta o gráfico de perda para os conjuntos de treino e validação ao longo do treinamento do modelo de RCN utilizando 200 épocas.

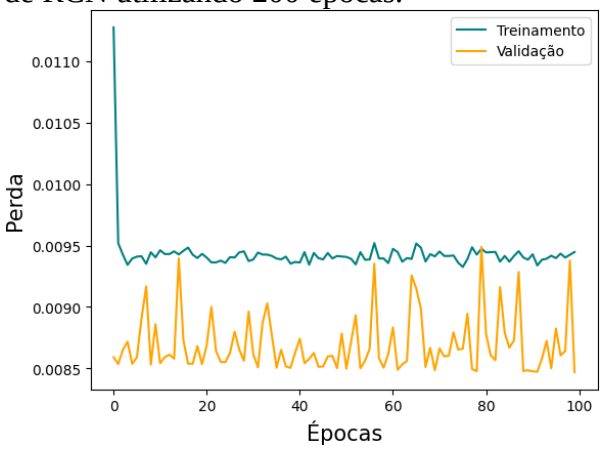


Figura 5: Gráfico de evolução das perdas ao longo de 100 épocas na etapa de treinamento/validação

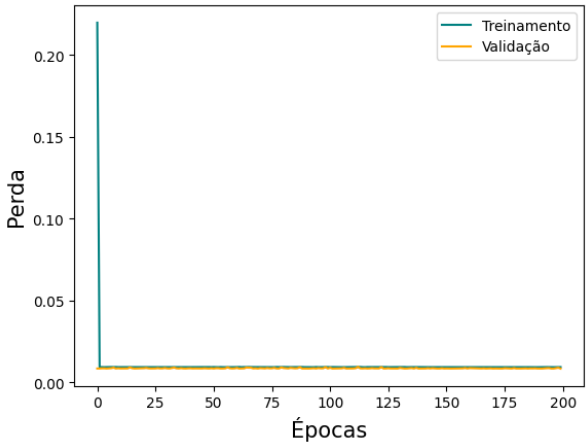


Figura 6: Gráfico de evolução das perdas ao longo de 200 épocas na etapa de treinamento/validação

Analisando as amostras, nota-se que elas apresentam grande variabilidade em seu aspecto visual. No entanto, sabe-se que os valores de coeficientes de atrito estão, em sua maioria, inseridos no intervalo entre 0,60 e 0,80. Tendo isso em vista, a Figura 5 demonstra que o conjunto de validação apresentou grandes variações, o que foi mitigado aumentando o número de épocas para 200 (Figura 6). Isso indica que essa diferença influencia a performance da rede em detectar padrões.

As métricas sugerem que o modelo RNC obteve desempenho adequado em se ajustar aos dados. Entretanto, a Figura 5 demonstra a dificuldade do modelo em se ajustar aos dados de amostras ao longo do treinamento. Os dados ainda revelam que as previsões médias absolutas do modelo RNC possui diferença menor que as de regressão linear.

O comportamento oscilatório e não convergente das perdas no processo de validação ao longo das épocas pode ser explicado pela baixa quantidade de amostras nesta etapa e possível interferência de amostras (quadrículas) que apresentavam elementos outros além do revestimento asfáltico, como por exemplo sinalização horizontal da pista (como observado na Figura 7). Tal distorção do recorte pode ter sido causada pela distorção linear do mosaico da PPD obtida na ferramenta *Google Earth PRO* que apresentava pequenas distorções de alinhamento.

Figura 7: Quadrículas que apresentavam elementos de sinalização horizontal.

A Tabela 2 compara as métricas de análise de erro médio quadrático (MSE), o erro médio absoluto (MAE) e o erro médio absoluto percentual (MAPE) em ambos os modelos durante a aplicação dos seus respectivos conjuntos de testes.

Tabela 2: Resultados dos erros médios absolutos (MAE), erros médios quadráticos (MSE) e erros médios absolutos percentuais (MAPE) das técnicas RGB-HSV e RNC

	MSE	MAE	MAPE
RGB-HSV	0,016	0,105	16,54%
RNC	0,008	0,073	11,32%

Mesmo apresentando *grooving* no trecho inicial da pista, observou-se que tal condição não interferiu na previsão do coeficiente de atrito, tendo em vista os baixos valores dos erros médios absolutos e quadrático médio.

Em uma pesquisa de identificação de texturas por meio de IA, Espíndola *et al.* (2021)

obtiveram excelente acurácia e precisão. Os pesquisadores utilizaram técnicas de *deep learning* para classificar tipos de superfície de pavimento em um sistema de avaliação automática. Os modelos desenvolvidos com base em redes neurais convolucionais identificaram cinco classes de superfícies: asfalto, concreto, intertravado, paralelepípedo e não pavimentado. Os modelos foram treinados com quase 50 mil imagens de rodovias brasileiras, alcançando resultados satisfatórios, com o modelo ResNet50 atingindo quase 100% de acurácia, precisão e *recall*.

CONCLUSÕES

Pela proximidade das métricas de avaliação, a confiabilidade no modelo de regressão linear é melhor que na rede neural convolucional (RNC). A avaliação do desempenho do algoritmo na estimativa do coeficiente de atrito foi aferida por meio dos gráficos de performance, mostrando a evolução das perdas e a acurácia ao longo das épocas.

Não é possível afirmar que, apesar de apresentar as melhores métricas de avaliação, o modelo de RNC seria o mais confiável comparado ao de regressão linear RGB-HSV. Isso se dá pela notória dificuldade da rede em encontrar padrões durante o treinamento ao longo das épocas. Algumas quadrículas apresentando pinturas de sinalização, por exemplo, podem ter contribuído para esse problema, dado que a RNC procura encontrar padrões na imagem para correlacionar com o coeficiente de atrito correspondente. As bordas das pinturas representam alguns dos padrões que a RNC pode levar em consideração em seu aprendizado. O modelo de regressão por extração de características, por sua vez, sintetiza essas informações dos canais RGB e HSV. Como estão, em média, próximas da tonalidade geral de pista, esses objetos podem não afetar o desempenho como na RNC.

Avalia-se que a questão, ora tratada como um problema de regressão, tenha diferentes resultados supondo-a como um problema de classificação, tendo em vista que diversos indivíduos, sem padrões de correlação aparente, possam vir a ser identificados com o mesmo coeficiente de atrito. Propõe-se para trabalhos futuros, com maior base de dados, realizar esta comparação.

Espera-se que o trabalho contribua para o desenvolvimento de ferramenta que possa auxiliar operadores de aeródromos em tomadas de decisão de processos de manutenção de pistas de pouso e decolagem. A partir disso, pode-se garantir incremento de segurança das operações em aeroportos brasileiros.

BIBLIOGRAFIA

ABADI, M.; AGARWAL, A.; BARHAM, P.; BREVDO, E.; CHEN, Z.; CITRO, C.; CORRADO, G. S.; DAVIS; Y; DEAN, J.; DEVIN, M.; GHEMAWAT, S.; GOODFELLOW, I.; HARP; REW; IRVING, G.; ISARD, M.; JOZEFOWICZ, R.; JIA, Y.; KAISER, L.; KUDLUR, M.; LEVENBERG, J.; MANÉ, D.; SCHUSTER, M.; MONGA, R.; MOORE, S.; MURRAY, D.; OLAH, C.; SHLENS, J.; STEINER, B.; SUTSKEVER, I.; TALWAR, K.; TUCKER, P.; VANHOUCKE, V.; VASUDEVAN, V.; VIÉGAS, F.; VINYALS, O.; WARDEN, P.; WATTENBERG, M.; WICKE, M.; YU, Y.; ZHENG, X. **TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems**. [*S. l.: s. n.*], 2015. Disponível em: https://www.tensorflow.org/.

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.

AMARASIRI, S.; GUNARATNE, M.; SARKAR, S. Use of digital image modeling for evaluation of concrete pavement macrotexture and wear. **Journal of Transportation Engineering**, [*s. l.*], n. May, p. 548–556, 2012. Disponível em: http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000365.

ANAC. **IS Nº 153.205-001 - Monitoramento da irregularidade longitudinal, atrito e macrotextura do pavimento da pista pouso e decolagem**. Brasil: 2020.

ANAC. **RBAC nº 153 Aeródromos - Operação, Manutenção e Resposta à emergência**. Brasil: 2021.

AQUINO, T. S. D. A.; OLIVEIRA, F. H. L. de; ALBUQUERQUE, V. A. M. de; PONTE, C. N. M. da. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE MACROTEXTURA DE PAVIMENTO ATRAVÉS DE FOTOGRAMETRIA DE CURTA DISTÂNCIA. **47ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)**, [*s. l.*], 2022.

ARAÚJO, V. M. de C. **Avaliação da textura de misturas asfálticas em face a compactação para uso em revestimentos aeroportuárioas a partir do uso do processamento digital de imagens**. Fortaleza: [*s. n.*], 2017. 2017.

BOYADZHIEV, T.; TSVETANOV, S.; DIMITROVA, S. Deep Learning Image Classification for Pneumonia Detection. [*s. l.*], p. 1–3, 2022. Disponível em: Acesso em: 11 set. 2022.

DOS ANJOS, J. R. L. **InferenCNN: Uma biblioteca para inferênca de Redes Neurais Convolucionais multiplataforma em OpenCL**. 2019. - Universidade Federal do Pernambuco, Recife 2019.

ESPÍNDOLA, A. C.; NOBRE JÚNIOR, E. F.; SILVA JÚNIOR, E. T. Pavement Surface Type Classification Based on Deep Learning to the Automatic Pavement Evaluation System. **XLII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, [*s. l.*], 2021.

FAA. **AC 150/5320-12C - MEASUREMENT, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF SKID-RESISTANT AIRPORT PAVEMENT SURFACES**. [*S. l.: s. n.*], 1997. 1997. Disponível em: Acesso em: 30 ago. 2022.

FAA. **AC NO:150/5320-12D - Measurement and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces**. Subject: AIRCRAFT ICE PROTECTION Date: 8/16/06 AC No: 20-73A. 2005.

GHADERI, O.; ABEDINI, M. Evaluation of the airport runway flexible pavement macro-texture using digital image processing technique (DIPT). **International Journal of Pavement Engineering**, [*s. l.*], 2021.

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.

GUO, Q.; SHI, Y.; WANG, S. Research on deep learning image recognition technology in garbage classification. **Proceedings - 2021 Asia-Pacific Conference on Communications Technology and Computer Science, ACCTCS 2021**, [*s. l.*], p. 92–96, 2021. Disponível em: Acesso em: 11 set. 2022.

HAFEMANN, L. G.; OLIVEIRA, L. S.; CAVALIN, P. R.; SABOURIN, R. Transfer Learning between Texture Classification Tasks using Convolutional Neural Networks. **2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)**, [*s. l.*], 2015.

ICAO. Airport Services Manual: Part 2, Airport Surface Conditions. **Doc 9137**, [*s. l.*], 2002.

KERAS. [*S. l.: s. n.*], [*s. d.*]. Disponível em: https://keras.io/api/. Acesso em: 27 jun. 2023.

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.

PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL V. AND THIRION, B.; GRISEL, O.; BLONDEL, M.; PRETTENHOFER P. AND WEISS, R.; DUBOURG, V.; VANDERPLAS, J.; PASSOS, A.; COURNAPEAU, D.; BRUCHER, M.; PERROT, M.; DUCHESNAY, E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, [*s. l.*], v. 12, p. 2825–2830, 2011.

QUARIGUASI, J. B. F.; OLIVEIRA, F. H. L. de; REIS, S. D. S. e. Modelo de previsão do coeficiente de atrito para pista de pouso e decolagem com uso de redes neurais artificiais.

TRANSPORTES, [*s. l.*], v. 29, n. 2, p. 2401–2401, 2021. Disponível em: https://revistatransportes.org.br/anpet/article/view/2401. Acesso em: 17 out. 2022.

SHANG, L.; YANG, Q.; WANG, J.; LI, S.; LEI, W. Detection of rail surface defects based on CNN image recognition and classification. **International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT**, [*s. l.*], v. 2018-February, p. 45–51, 2018. Disponível em: Acesso em: 11 set. 2022.

ZUNIGA-GARCIA, N.; PROZZI, J. A. High-Definition Field Texture Measurements for Predicting Pavement Friction. **Transportation Research Record**, [*s. l.*], v. 2673, n. 1, p. 246–260, 2019.

.

METODOLOGIA DE FISCALIZAÇÃO BASEADA EM BIM PARA PROJETOS E OBRAS PÚBLICAS. ESTUDO DE CASO DOS PROJETOS E DAS OBRAS DE MODERNIZAÇÃO DO TERMINAL DE PASSAGEIROS DO AEROPORTO DE MONTES CLAROS - MG

Guilherme, Guignone, Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO | Distrito Federal, Brasília | gguignone@infraero.gov.br
Heurie, Rocha, Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO | Distrito Federal, Brasília | heurie_silva@infraero.gov.br
Vitor Hugo, Rizzotto, Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - INFRAERO | Distrito Federal, Brasília | vrizzotto.br@infraero.gov.br
Calmon, João Luiz, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES | Vitória, Espírito Santo | joao.gama@ufes.br

*** Corresponding author e-mail address**: gguignone@infraero.gov.br

PAPER ID: SIT2180

ABSTRACT

The engineering activities for the modernization of the Passenger Terminal at Montes Claros Airport – MG included projects and construction execution based on BIM and Inspection, carried out by the public administration, adopting a Custom Inspection Methodology Based on BIM - *Building Information Modeling*. The Methodology was conceived with a view to providing increased performance in the management of communication and in the development of engineering solutions, involving, in an integrated manner, Contractor - private initiative and Contractor - Public Company. As assumptions, it was considered that the development of models was validated by the Inspection on scheduled dates, according to the Project's milestone schedule, and that communication occurred assertively through the use of technological infrastructure and designed BIM processes. It could be seen that its adoption provided several benefits for the design and works stage, among them: adherence to the project and work schedule; increased performance in design and construction solutions through collaborative actions; minor design revisions; minor unpredictability during the work; better solutions for the covering of works; among others. The Case Study is proposed as a framework for the inspection of public works, mainly applicable to transport infrastructure projects and works in public administration.

Keywords: BIM; Airports; Collaboration; Communication; Public Construction

ACKNOWLEGDEMENTS

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária – INFRAERO por possiblitar o compartilhamento da experiência obtida no Projeto de Ampliação e Modernização do Terminal de Passageiros do Aeroporto de Montes Claros – MG.

1. INTRODUCTION

O “Building Information Modeling”, ou Modelagem da Informação da Construção, é uma metodologia que contempla processos, ferramentas, pessoas e políticas e, quando adotada da maneira adequada, apresenta potencial para gerar benefícios para a sociedade (SUCCAR, 2009).

Constatam-se no país, recentes marcos legais que exigem o uso do BIM. Em abril de 2021, a Lei de Licitação e Contratação, Lei nº 14.133 (2021), dispôs que nas licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura, sempre que adequada ao objeto da licitação, deverá ser, preferencialmente, adotada a Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modelling* - BIM). Assim, pretende-se que as obras e serviços de engenharia a serem executadas ou contratadas pela Administração Pública, adote o BIM, visando melhorar a aderência ao cronograma de execução da construção, minimizar imprevistos e retrabalhos durante a construção, reduzir custos no desenvolvimento de projetos e de construções, dentre outros benefícios. Outro marco legal importante é o Decreto 10.306 (2020). Ele preconiza que os projetos a serem executados ou contratados pela Administração Pública Federal contemplem os usos BIM previstos no Decreto e estruturados nas datas de 2021, 2024 e 2028.

Uma ferramenta importante no que se refere a diretrizes para usos do BIM em um País, Estado ou região é o *BIM Mandate*. Ele pode ser definido como um conjunto de requisitos de troca e de entrega de informações estipulados por uma autoridade reconhecida (por exemplo, um Governo ou um Ministério) em um país ou estado/região. Esses Requisitos de Informações incluem o uso obrigatório de ferramentas e fluxos de trabalho BIM em projetos de tamanho/valor especificados ou a entrega de Ativos Digitais especificados em uma ou mais fases do Ciclo de Vida de Ativos (BIM DICTIONARY, 2023). Há, recentemente publicados no pais, alguns *BIM Mandates*, como: o Manual de Projetos Aeroportuários do Ministério da Infraestrutura (2021); o Caderno de Especificações de Projetos para Contratação de Projetos de Edificações do Governo do Estado do Paraná (2018), O Guia de Implantação e Implementação BIM do Governo de Santa Catarina (2022), dentre outros. Entretanto, em nenhum deles, há premissas para fiscalização baseada em BIM para projetos e obras públicas. A importância de conceber uma metodologia de fiscalização baseada em BIM é evidente. É importante citar que o uso do BIM em projetos e obras de engenharia pode representar ganhos significativos. Há dados que o potencial de economia de custos estimados para obras de engenharia de infraestruturas é por volta de 15% a 25% (BOSTON CONSULTING GROUP, 2016). No que se refere ainda ao uso do BIM em infraestrutura, destaca-se como promissor no país o uso do BIM em aeroportos.

Um aeroporto apresenta demandas diversas, quer seja nas etapas de concepção e de projeto, quer seja na construção, operação e manutenção do empreendimento. No que se refere à etapa de projeto, há disciplinas envolvidas relacionadas a projetos de engenharia de edificações e de infraestrutura. O processo de execução dos projetos precisa ser planejado de forma que as informações sejam disponibilizadas com confiabilidade e no momento adequado. A fim de elevar o desempenho do processo de desenvolvimento de projetos aeroportuários, proporcionando soluções com maior assertividade, elevação do potencial de gestão da informação e minimização de retrabalhos, o uso da metodologia *Building Information Modeling - BIM* tende a ser uma relevante opção. De acordo com Abbondati *et al.* (2019), o uso da metodologia BIM é essencial para desenvolver modelos inteligentes para construções e planejamento e gestão de projetos de infraestrutura. A modelagem BIM aplicada a projetos de infraestrutura, como de aeroportos, permite a inserção nos modelos de informações sobre materiais, certificações, procedimentos de manutenção e parâmetros estruturais e funcionais. Pesquisas têm demonstrado o uso do BIM em aeroportos como promissor (ALVAREZ ET AL., 2021; BIANCARDO ET AL., 2020; KESKIN E SALMAN, 2020)

Constata-se carência em relação a pesquisas e documentos que contemplem uma proposta de metodologia de uso do BIM aplicada à fiscalização de projetos e obras públicas. Percebe-se também que estudos

envolvendo casos práticos em relação ao uso do BIM em aeroportos são recentes, tais como os 3 primeiros casos de uso registrados: Aeroporto de Frankfurt na Alemanha em 2003, de Heathrow em Londres em 2004 e de Gatwick em Londres em 2010 (SHOOLESTANI ET AL., 2015; BUILDINGSMART UK, 2010; NEATH ET AL., 2014). O objetivo do artigo é apresentar uma Metodologia de Fiscalização Baseada em BIM aplicável a fiscalização de projetos e obras públicas. Esta metodologia foi adotada no Projeto e nas Obras de Modernização do Terminal de Passageiros do Aeroporto de Montes – Claros -MG. Serão detalhadas neste artigo a Metodologia utilizada, sua execução e seus resultados principais.

2 DIFERENCIAIS DO ESTUDO

O uso do BIM em aeroportos recente, verificam-se utilizações efetivas a partir dos anos 2010 (BUILDINGSMART UK, 2010; NEATH ET AL., 2014). Soma-se ainda que, de todos os artigos publicados sobre o uso do BIM em aeroportos, em nenhum deles são propóstos métodos para realizar a fiscalização de projetos e construções baseados em BIM. É importante destacar que, na maioria dos casos, operadoras aeroportuárias contratam serviços de engenharia em detrimento de executarem por meios próprios. Neste contexto, notam-se demandas significativas de estudos de referência em relação a fiscalização de serviços de engenharia aeroportuária. No que se referem à fiscalização de projetos e de obras na administração pública, apesar de haver no país alguns Manuais, não há estudos de caso que demonstrem como foram adotados os procedimentos, pautados em engenharia simultânea, para a execução de fiscalização de projetos e obras baseados em BIM. Este artigo é o primeiro no mundo que apresenta um estudo de caso de fiscalização de projetos e de obra pública de um Aeroporto. O estudo contempla a concepção e a execução de um método personalizado de fiscalização baseada em BIM.

O primeiro uso de BIM para aeroportos foi estudado por Robert Aish (1986), onde avaliou o desenvolvimento em fases do Terminal de Passageiros 3 do Aeroporto de Heathrow em Londres. Em 2010 o Aeroporto de Gatwick, em Londres, implementou o BIM objetivando a integração com os seus processos existentes e adotá-lo em todas as fases do ciclo de vida do empreendimento. O uso do BIM possibilitou ganhos significativos com relação aos entregáveis de projetos e à gestão de ativos no aeroporto (NEATH *ET AL.*, 2014). O Aeroporto Internacional de Denver iniciou o seu processo de implementação do BIM em 2010 com o seu projeto de Hotel. Desde então, institucionalizou o BIM e estendeu o seu uso a todas as fases do ciclo de vida de seus ativos (BALL, 2010).

Com relação a pesquisas envolvendo o uso do BIM em aeroportos há publicações recentes com abordagens direcionadas ao uso do BIM na fase de projeto, de construção e de manutenção e reforma. Alvarez *et al.* (2021) demonstraram estratégias, com o uso da metodologia BIM, para controlar e supervisionar reformas em pavimentos de pistas de pouso e decolagem. Biancardo et al. (2020) apresentaram soluções em BIM, realizadas em modelos de arquitetura e de estruturas, para pontes de embarque para as obras de ampliação de um Aeroporto. Keskin e Salman (2020) apresentam uma proposta para gerenciamento de aeroportos, baseada em BIM, que conecta as áreas clientes de um aeroporto com os seus requisitos operacionais.

3 PROJETOS E OBRAS DE AMPLIAÇÃO E REFORMA DO TERMINAL DE PASSAGEIROS DO AEROPORTO DE MONTES CLAROS -MG

As obras de modernização e ampliação do Terminal de Passageiros do Aeroporto de Montes Claros - MG iniciaram-se no primeiro semestre de 2020 e foram concluídas no segundo semestre de 2021. Envolveu a ampliação do terminal em ambas as extremidades (Figura 1c), reforma e modernização do terminal atual e mudança de sua arquitetura e instalações. As obras e os projetos foram contratados e fiscalizados pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - Infraero. O Consórcio RAC Engenharia e GEPLAN foi quem executou. Não havia no Contrato exigência de desenvolver os projetos e as obras em BIM,

entretanto a Contratada propôs o uso do BIM para a execução do Contrato.

Figura 1 Terminal e áreas de ampliação.

Figura 2 Fachada do terminal de passageiros antes de sua modernização.

4 METODOLOGIA BASEADA EM BIM PARA PROJETOS E OBRAS

A Metodologia foi concebida e executada pelos autores do artigo que, também, fizeram parte do Corpo Técnico de Fiscalização do Contrato para a fiscalização dos projetos e da obra. Foi necessário realizar um método de fiscalização baseado em BIM personalizado para elevar o desempenho do processo de fiscalização do contrato.

A Equipe de Fiscalização dos Projetos e das Obras avaliou o Contrato e realizou a seguinte reflexão: sabendo-se que os projetos e as obras serão desenvolvidos em BIM, por que na execução do Contrato, previsto na modalidade Contratação Integrada (projeto e obra), não poderia ser adotado o BIM de forma colaborativa, envolvendo Contratada e Fiscalização, durante o desenvolvimento dos processos de fiscalização? Seria relevante que a administração pública não atuasse apenas na ponta do processo, atuando após o recebimento dos entregáveis finais, mas que fosse desenvolvido um fluxo em que esta fosse coparticipe dos processos de desenvolvimento, contribuindo, revisando e agindo de forma proativa. Assim, tender-se-ia a lograr maior eficiência nos resultados finais, gerando produtos que melhor atendessem aos anseios da sociedade. No Brasil, é importante ressaltar, que o desenvolvimento do BIM ainda é um processo recente, de aproximadamente 10 a 15 anos. As Normas brasileiras em relação ao uso do BIM se encontram ainda em construção em um processo que se iniciou em 2010, culminando na Norma ABNT NBR 15965 – Sistema de classificação da informação da construção (2011), e apenas em 2022 entraram em vigor as Normas ABNT ISO 19650 Parte 1 e Parte 2 (2022). Nota-se a Revolução do uso do BIM que está em curso no país com a publicação de Normas, Decretos e Legislações determinantes para mudanças nos processos tradicionais da indústria da construção brasileira.

4.1 Metodologia de Fiscalização Baseada em BIM para Projetos de Engenharia na Administração Pública

A Metodologia baseia-se na utilização de ferramentas (infraestrutura de redes, softwares e hardwares), recursos humanos e processos. Ela foi materializada por meio de um estudo prático adotando-se como ferramenta tecnológica principal os softwares da Autodesk Revit e Navisworks Manage, ferramentas de modelagem e de verificação, respectivamente. Foi adotado também, como ferramenta de gestão de BCF - *BIM Collaboration Format*, o BIMcollab. Algumas soluções BIM podem ser destacadas:

Visualização do modelo tridimensional contendo todos os projetos complementares. Recurso fundamental para a melhor

visualização de todos os sistemas compatibilizados e promover a elevação do potencial de investigação proativa e fomento com relação a soluções de engenharia de forma multidisciplinar e integrada. A Fiscalização pôde fazer observações no modelo, antecipando questões de projeto antes da entrega formalizada;

Foram anexadas aos componentes do modelo tridimensional informações como endereços eletrônicos, imagens e especificações dos materiais e equipamentos para avaliação prévia da fiscalização. Assim, foi possível uma avaliação detalhada e prévia de todos os componentes e equipamentos propostos, incluindo propostas de equivalência técnica;

A Fiscalização pôde avaliar se havia conflitos entre os componentes geométricos e propriedades não gráficas. A fiscalização pôde, por ela mesma, gerar relatórios de interferências, contemplando, inclusive, avaliações especificas, por exemplo: determinado elemento estrutural com determinado elemento de uma outra disciplina;

A Fiscalização pôde acompanhar o cronograma físico da obra atrelado aos componentes tridimensionais (BIM 4D). Foi possível verificar e ajustar o planejamento da execução da obra se beneficiando pela interconexão entre o cronograma e os elementos tridimensionais e se antecipar a possíveis situações; dentre outras.

Neste contexto, o fluxo das atividades pode ser representado conforme Figura 3. Os profissionais, projetistas BIM da Contratada, que desenvolvem os modelos em suas disciplinas, encaminham os modelos IFC - *Industry Foundation Classes* - para o Coordenador BIM da Contratada. Este profissional realizava a validação dos modelos e dos processos de compatibilização. Havendo ainda ajustes, retornava para os autores dos projetos. Quando o processo de maturidade e desenvolvimento dos modelos atingisse um nível aceitável, antes da entrega oficial para a Fiscalização, encaminhava-se o Modelo Federado em formato nwd (Navisworks) para a Fiscalização avaliar. É justamente nesta etapa que a Fiscalização atuava de forma ativa durante o processo de desenvolvimento, não apenas após a entrega formalizada. Estes processos ocorreram de forma cíclica, visando aprimoramentos.

4.2 Metodologia de Fiscalização Baseada em BIM para Obras de Engenharia na Administração Pública

Avançada a fase de projeto, foi possível também estruturar ações para a melhoria do processo de fiscalização da obra. Neste contexto, por meio da ferramenta tecnológica Navisworks Manage (Autodesk) foi possível desenvolver o Planejamento e Controle da Obra baseado em BIM (BIM 4D). Estas ações são relevantes durante a obra, porém na transição projeto e obra também se destacam importantes soluções, como: a) a melhor verificação dos itens da Planilha de Serviços e Quantidades com o projeto para a elaboração do Termo de Referência para Contratação da Obra; b) avaliação do projeto de etapeamento mais eficiente, dentre outras. A seguir, destacam-se alguns benefícios relevantes no que tange à dimensão BIM 4D com a adoção da proposta de metodologia de Fiscalização BIM:

- Verificação da melhor compatibilidade do previsto na planilha de serviços e quantidades e no cronograma físico da obra;
- Avaliação do projeto de etapeamento de forma mais eficiente;
- Visualização das etapas da obra atreladas ao modelo tridimensional;
- Acompanhamento da obra em relação ao planejado e executado;
- Acompanhamento da obra com ações proativas (o potencial de ações proativas tende a se elevar com a fácil visualização dos processos);
- Adequações dos procedimentos operacionais em uma tipologia construtiva e operacional complexa (por exemplo: aeroportos) e desenvolvimento da obra. Este item foi fundamental, pois foi possível discutir com vários interessados, inclusive com aqueles que não são familiarizados com os aspectos técnicos de engenharia, sobre alternativas/soluções para aspectos operacionais imprevistos); dentre outras.

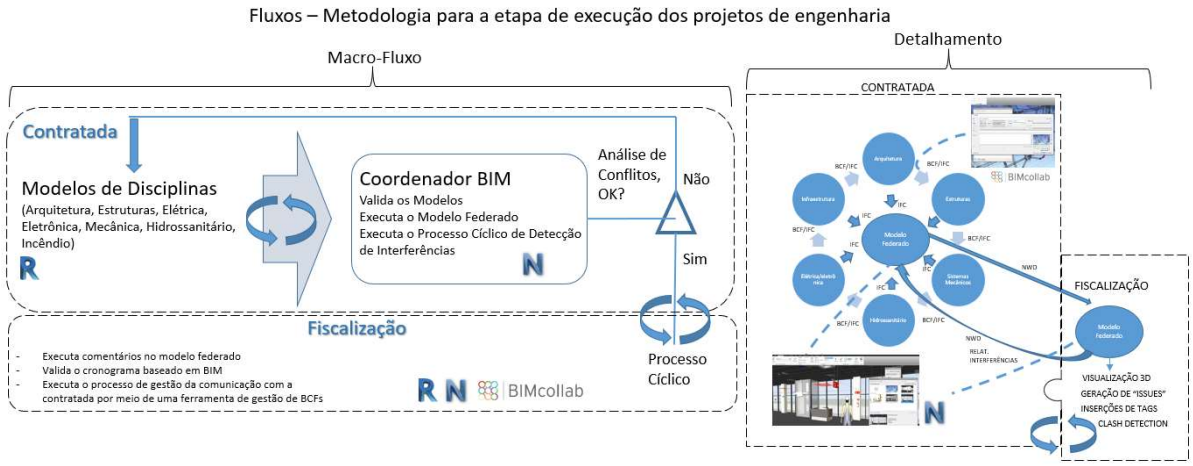


Figura 3 Fluxos de atividade de acordo com a Metodologia de Fiscalização Baseada em BIM para Projetos de Engenharia na Administração Pública.

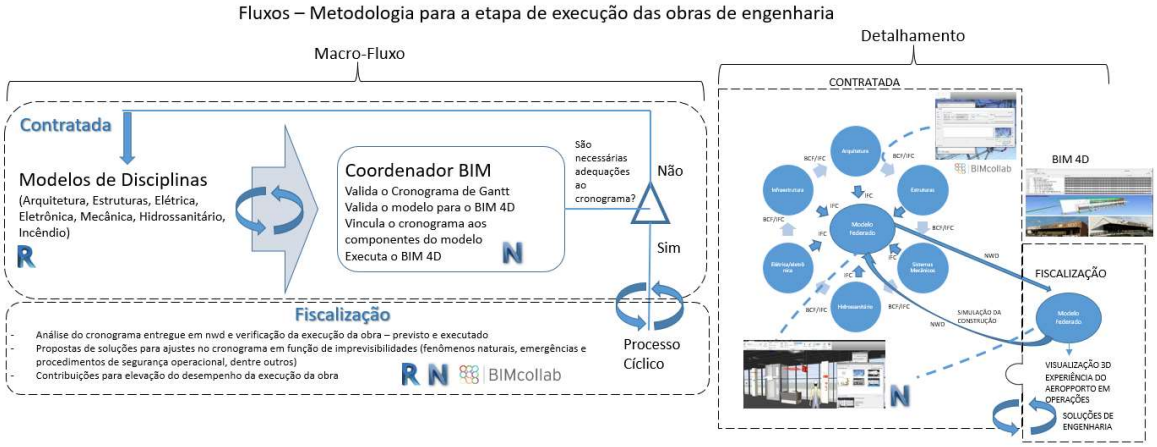


Figura 4 Fluxos de atividade de acordo com a Metodologia de Fiscalização Baseada em BIM para Obras de Engenharia na Administração Pública.

4.3 Soluções BIM Adotadas: Metodologia de Fiscalização Baseada em BIM para Projetos e Obras de Engenharia na Administração Pública

3.3.1 Programa de Capacitação

O primeiro passo para viabilizar o uso da Metodologia proposta foi conceber um programa de capacitação para a equipe de Fiscalização do Projeto e da Obra. Os projetistas e executores da obra contratados já conheciam as ferramentas tecnológicas necessárias, logo os maiores esforços de capacitação foram direcionados para a equipe de fiscalização. No que tange ao treinamento para a empresa contratada, foi restrita à apresentação da metodologia e a validação de sua utilização na prática. Para os treinamentos para a equipe de fiscalização, foram realizados treinamentos virtuais abordando o uso da Ferramenta Navisworks Manager da Autodesk e BIMcollab ajustados à teoria metodológica concebida. Uma das premissas fundamentais foram adotar as ferramentas tecnológicas que contratada e contratante já possuíam, que apresentassem uma adequada curva de aprendizagem e que a metodologia fosse de fácil assimilação considerando os diferentes níveis de maturidade BIM e de aptidão no uso de ferramentas tecnológicas da equipe de fiscalização. A Figura 5 apresenta algumas imagens das gravações dos treinamentos. Elas ainda poderão ser acessíveis para consulta de

acordo com o “QR Code” também apresentado na Figura 5.

Figura 5 Treinamentos adotados para viabilização do uso da Metodologia de Fiscalização baseada em BIM.

3.3.2 Uso de Realidade Aumentada para a Fase de Projeto

Um dos usos BIM fundamentais adotados na Metodologia de Fiscalização BIM foi o uso de realidade aumentada (Figura 6). Este uso foi adotado, tanto para a fase de projetos, tanto para a fase de construção. Para a fase de projetos, o uso foi fundamental para validação da proposta de fachada, para a melhor compreensão dos espaços internos e configuração de leiaute, para validação da proposta de etapeamento e para visualização do planejamento da execução de instalações. É possível visualizar os modelos tridimensionais antes da execução da construção, possibilitando prever como a construção ficará quando concluída. Foram utilizados dispositivos móveis, tais como celulares, pela equipe de fiscalização da obra, permitindo a visualização dos objetos projetados em escala real. O Software adotado foi o Augin.

Figura 6 Uso de Realidade Aumentada na execução da Metodologia de Fiscalização baseada em BIM.

3.3.3 Avaliação das Superfícies Livres de Obstáculos

É necessário contemplar em aeroportos projetos de superfícies imaginárias, tridimensionais, denominadas superfícies livres de obstáculos. Estas apresentam dimensões, configurações e inclinações específicas, conforme o código de referência do aeroporto. A fiscalização realizou a modelagem destas superfícies imaginárias visando avaliar o impacto em relação ao projeto do terminal de passageiros e em relação aos diversos componentes do aeródromo. Realizou-se a modelagem com o software Revit (Autodesk). Após isso, o modelo foi importado para o software Infraworks (Autodesk), ambiente integrador de sistemas de informações geográficas (SIG) e BIM, onde foi possível agregar precisão geográfica aos modelos. Assim, foi possível avaliar, com precisão, se havia elementos conflitantes com essas áreas de segurança.

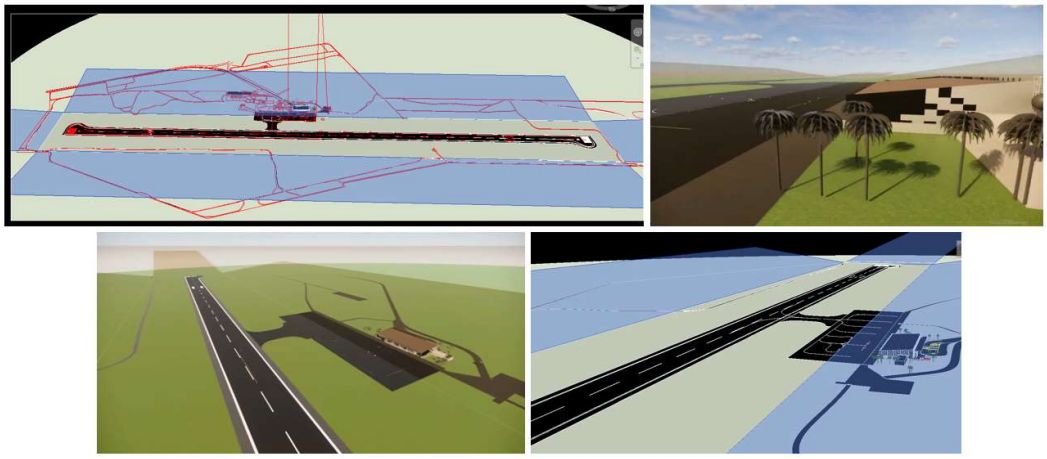


Figura 7 Uso da modelagem das superfícies livres de obstáculos.

3.3.4 Uso do BIM 4D

O uso do BIM 4D foi relevante, tanto para as atividades de projeto, tanto para as atividades de execução da obra. Para a etapa de projeto, foi importante para que a fiscalização melhor compreendesse a proposta de planejamento da execução da obra e pudesse, inclusive, propor adequações. As propostas de adequações eram executadas pela fiscalização no modelo disponibilizado em nwd (extensão da ferramenta Navisworks Manage - Autodesk). Como se tratava de uma obra em que o terminal de passageiros não poderia interromper sua operação, foi importante a participação e o entendimento do proposto pelas áreas de segurança e de operações do aeroporto a fim de propor as melhores soluções de engenharia integrada. Na etapa de execução, o BIM 4D foi fundamental para a fiscalização realizar o previsto e o executado.

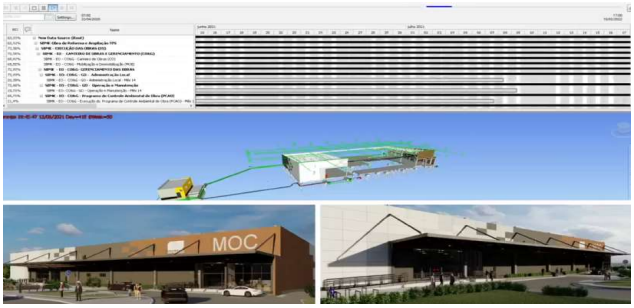


Figura 8 Uso do planejamento e acompanhamento da execução da obra – BIM 4D.

3.3.5 Comunicação Visual

O uso do BIM foi também fundamental para que uma proposta conceitual de comunicação visual fosse absorvida e executada pela Contratada. A fiscalização apresentou as referências que considerava relevante e a Contratada modelou os elementos podendo melhor demonstrar nas reuniões os resultados utilizando-se do Modelo Federado. Foi possível também disponibilizar o modelo para a fiscalização para que ela pudesse fazer a inclusão dos materiais de acabamento de acordo com o projeto, utilizando-se de uma ferramenta de renderização.

Figura 9 Soluções de comunicação visual.

3.3.6 Soluções Pontuais

Utilizando-se o modelo federado disponibilizado pela contratada, foi possível também que a Fiscalização realizasse avaliações e retornasse o modelo para a Contratada após a inserção de "*tags*" e geração de vistas com notificações. Verificações do impacto entre os componentes de fundação e instalações enterradas, entre equipamentos instalados na cobertura da edificação e superfície de transição e entre instalações no entreforro, são exemplos de avaliações que puderam ser potencializadas. Somam-se ainda soluções funcionais e estéticas para os gates de embarque e para o guarda corpo para apoio ao acesso ao embarque.

Figura 10 Soluções de engenharia por meio do Modelo Federado.

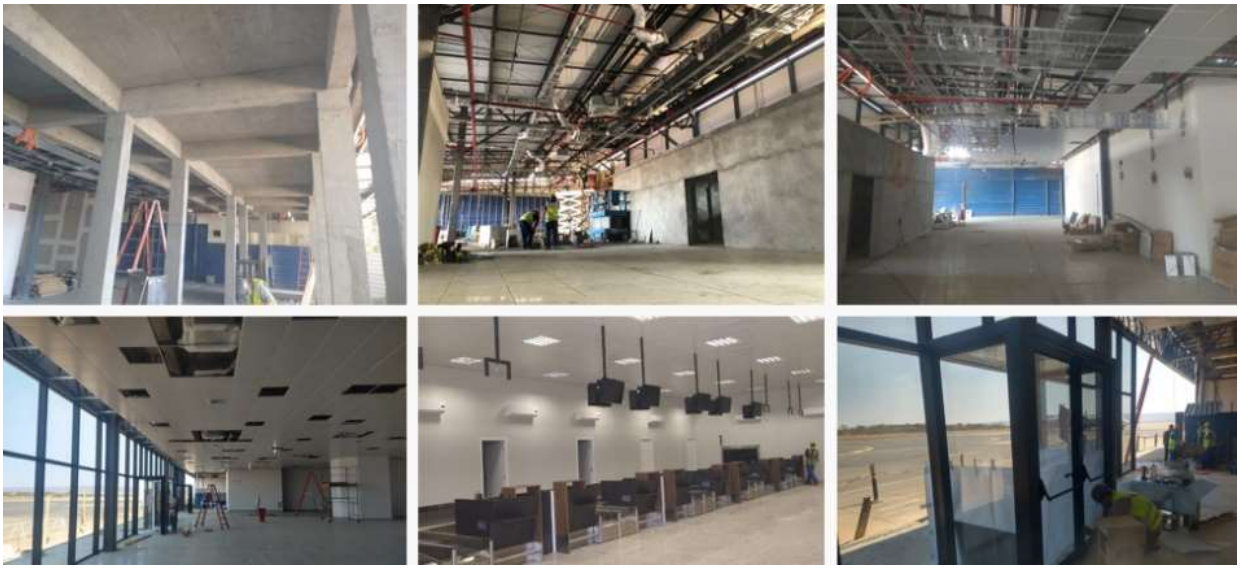


Figura 11 Soluções de engenharia na prática.

A adoção de "*tags*" nos componentes tridimensionais, contemplando situações a serem resolvidas, foi fundamental. Foi possível também incluir endereços de especificações técnicas contempladas na rede colaborativa, endereços eletrônicos de fabricantes, dentre outros que visam melhor avaliar, de forma preliminar ao envio oficial dos produtos, os itens propostos para anuência da Fiscalização.

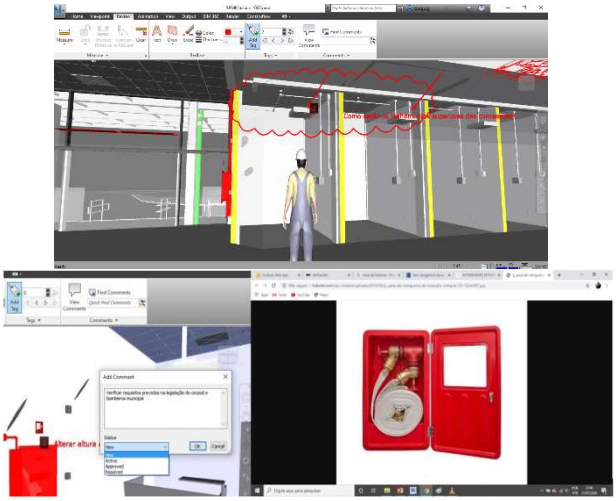


Figura 12 Uso de ferramenta de verificação de modelos para inclusão de tags e vistas.

3.3.7 Uso de Ferramenta de Renderização

Atualmente, em função do avanço tecnológico, é possível obter uma renderização do modelo BIM em tempo real. Assim, a fiscalização considerou utilizar ferramentas tecnológicas de renderização não apenas como um entregável, mas também para o processo de garantia da qualidade do modelo. Assim, nas reuniões entre os membros da fiscalização e reuniões conjuntas envolvendo contratada e contratante, foi utilizado também esse recurso. Por meio dele, podemos obter melhor entendimento dos modelos, verificar com maior exatidão inconsistências e trazer para a discussão os materiais de acabamento da edificação. É possível também, por meio do "QR code" acessa ao resultado final da renderização do modelo federado.

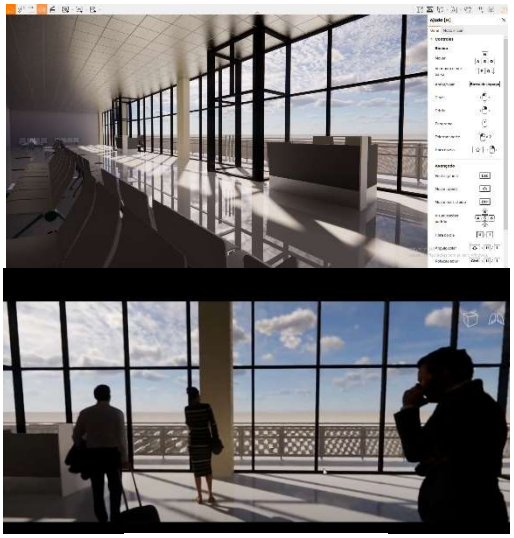


Figura 13 Uso de ferramenta de renderização.

3.3.8 Controle de Interferências

Um dos grandes benefícios foi incorporar na metodologia o processo de detecção de interferências entre disciplinas e elementos geométricos, já prevista na primeira fase do Decreto nº 10.306 (2020). Esta detecção foi realizada de forma preliminar ao envio dos documentos oficiais. Por meio da Figura 14, verifica-se que é possível gerar listas de conflitos e identificar cada interferência de forma isolada, classificando-a como nova, ativa, resolvida ou aprovada.

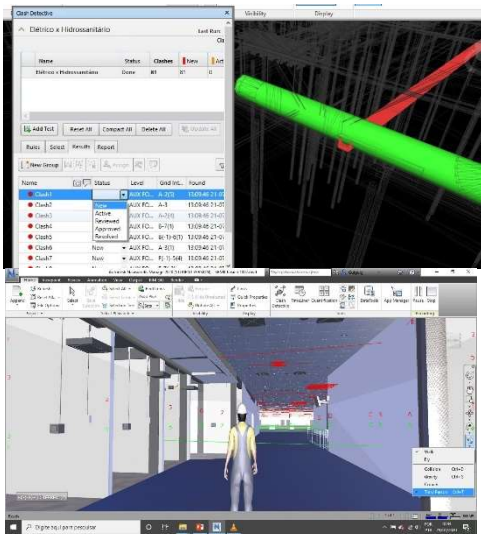


Figura 14 Uso de ferramenta de verificação de modelos para detecção de conflitos.

5 RESULTADOS

Com o uso da metodologia de fiscalização baseada em BIM para projetos e obras públicas foi possível: a) obter um melhor entendimento das questões expostas em reunião; b) melhor coordenação entre as análises e aprovações de projeto, pois a Contratante pôde melhor acompanhar o desenvolvimento do Projeto; c) elevação do potencial de colaboração da Contratante no projeto de etapeamento com sua expertise na área de engenharia aeroportuária e conhecimento dos aspectos regionais; d) menores revisões nos projeto, tendo em vista que as entregas ocorriam apenas após o esgotamento dos fluxos de análises e revisões nos modelos envolvendo contratada e contratante; d) menores interferências e imprevisibilidades durante a obra; e) o uso da realidade aumentada proporcionou uma melhor compreensão do projeto e elevação do potencial para garantia da qualidade dos modelos e soluções de engenharia, dentre outros benefícios.

Figura 15 Empreendimento concluído.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pôde-se constatar, por meio do estudo de caso, que a proposta metodológica, além de pioneira no país, foi testada em projeto de grande relevância como foi o caso das obras de modernização do Terminal de Passageiros do Aeroporto de Montes-Claros – MG, empreendimento estratégico para o Estado de Minas-Gerais. Nota-se que é possível adotar estratégias de colaboração personalizadas e eficientes para o desenvolvimento dos projetos de engenharia e execução de obras, envolvendo contratada e contratante na administração pública, e obter inúmeros benefícios. É sabido que, a fase inicial de desenvolvimento dos projetos em BIM, é o período com maior potencial para que as tomadas de decisão impactem na economicidade e melhores soluções de engenharia para a construção. Soma-se a ainda que o processo de desenvolvimento dos modelos BIM e garantia da qualidade têm uma importância fundamental, muito maior que apenas a geração de entregáveis. Nestas duas fases, início do projeto e seu desenvolvimento, a metodologia aqui proposta cumpre um papel fundamental, principalmente nos casos em que há contratação integrada envolvendo projeto e obra e empreendimentos que deverão conciliar atividades operacionais, de segurança e de construções. Este estudo de caso é um referencial importante para adoção na administração pública e em empreendimentos em infraestrutura de transportes, além de outros setores da engenharia. Tratam-se de boas referências para gerar economicidade nas construções, redução de atrasos e obras paralisadas, menores impactos ambientais, desperdícios de materiais e insumos e elevação da segurança nas construções.

REFERÊNCIAS

ABBONDATI ET AL. I-BIM for existing airport infrastructures. AIIT 2nd International Congress on Transport Infrastructure and Systems in a changing world (TIS ROMA 2019), 23rd-24th September 2019, Rome, Italy. Transportation Research Procedia, 45 (2020) 596– 603

AISH, R. Building Modelling: The Key to Integrated Construction CAD. Proc., International Symposium on the use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings, Bath, 1986

ALVAREZ ET AL. Opportunities in airport pavement management: Integration of BIM, the IoT and DLT. Journal of Air Transport Management 90 (2021)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Sistema de classificação da informação da construção. ABNT NBR 15965, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 19650-1: NBR ISO 19650-1 DE 05/2022 - Organização da informação acerca de trabalhos da construção - Gestão da informação usando a modelagem da informação da construção - Parte 1: Conceitos e princípios. 1 ed. Brasil, 2022. 40 p.

BALL, M. “Denver’s Airport Expansion Primes a Push toward BIM for Facility Management” Informed Infrastructure, 2015 [Online]. Available: https://informedinfrastructure.com/6773/bim-for-denver-airport-expansion/?print=pdf. buildingSMART UK, “Investing in BIM Competence,” buildingSMART UK, Watford, 2010

BIANCARDO et al. BIM Approach for Modeling Airports Terminal Expansion Infrastructures 2020, 5, 41

BIM DICTIONARY. Building Information Modelling (BIM). Disponível em: < https://bimdictionary.com/en/bim-mandate/1/>. Acesso em: 24/03/2023.

BRASIL. Lei Federal n.º 14.133, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília: Presidência da República, 2021. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_At

o2019-2022/2021/Lei/L14133.htm. Acesso em: 06 set. 2022.
BRASIL. Decreto n. 10.306, de 02 de abr. de 2020. Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling - Estratégia BIM BR, instituída pelo Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. Brasília, DF, 2020.
BIANCARDO ET AL. BIM Approach for Modeling Airports Terminal Expansion Infrastructures 2020, 5, 41 [8] B.
BOSTON CONSULTING GROUP, 2016. Digital in Engineering and Construction: The Transformative Power of Building Information Modeling, s.l.: Boston Consulting Group.
Caderno BIM: coletânea de cadernos orientadores : caderno de especificações técnicas para contratação e projetos em BIM – Edificações / coordenação: Lucimara Ferreira de Lima. - Curitiba, PR: Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística, 2018.
Guia de Implantação e Implementação BIM para Órgãos Públicos de Santa Catarina. Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade (2022)
KESKIN, B. Salman. Building Information Modeling Implementation Framework for Smart Airport Life Cycle Management Transportation Research Record 2020, Vol. 2674(6) 98–112
Manual de projetos aeroportuários [livro eletrônico] : volume único / [organização Marcio Maffili Fernandes, Leila Cristina Miateli Pires, Adriana Lima Rolim ; ilustração Gabriel Córdova]. -- 1. ed. -- Brasília, DF: Secretaria Nacional de Aviação Civil, 2021.
NEATH, S., et al., "Building Information Modelling in Practice: Transforming Gatwick Airport, U.K.," Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Vol. 167, No. 2, 2014, pp. 61–87.
Penn State, BIM Project Execution Planning Guide, BIM Project Execution Planning buildingSMART alliance™ (bSa) Project, Computer Integrated Construction Research Group, University Park, Pa., 201
SHOOLESTANI, A., B. SHOOLESTANI, T. FROESE, and D.J. VANIER, "SocioBIM: BIM-to-End User Interaction for Sustainable Building Operations and Facility Asset Management," 5th International/11th Construction Specialty Conference, Vancouver, B.C., Canada, June 8–11, 2015
SUCCAR, B. (2009) Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders. Automation in Construction, 18, 357-375.

BUSINESS MODEL FOR PERNAMBUCO REGIONAL AVIATION

Marcos Araújo de Souza Celestino*, Viviane Adriano Falção
Federal University of Pernambuco

*** Corresponding author e-mail address:** marcos.celestino@ufpe.br - viviane.afalcao@ufpe.br

PAPER ID: SIT2229

ABSTRACT

Regional airports are fundamental for the connectivity of a country, especially in the case of Brazil. Such airports have problems about infrastructure and flight supply, for example. The presence of a business model that will help their operation and viability is essential. This study seeks to analyze the business model present in the regional airports of Pernambuco, aiming to point out guidelines for improvement that will help the government in its operation. The analysis was carried out with the aid of the literature reference and through the Cluster, with the objective of presenting an overview of the sector of Brazilian regional airports through the cluster to find benchmarking airports that were used as a reference. The airports were basically in the same group except for Fernando de Noronha Airport, among the main problems the lack of communication channels with customers, infrastructure problems and lack of non-aeronautical revenues stand out. The guidelines aimed at improving the airport's business vision are fundamental for the viability of airports, being tools for possible subsidy policies and even future concessions.

Keywords: Regional, Airports, Business Model, Cluster.

INTRODUCTION

Initially, the airport was seen only as an infrastructure used to transport passengers and goods. Faced with the implementation of several reforms, especially with regard to economic deregulation and privatizations, the perception of the airport has also become a business that seeks financial goals (Chwiłkowska-Kubala, 2021). Thus, this change in the airport's vision meant that the application of an airport business model would help it to compete in the market, seeking more and more customers.

Regional aviation differs little from conventional aviation in terms of input combinations, such as aircraft, fuel, technical crew, and aerodromes that can accommodate current and projected capacity. However, a significant distinction emphasized by regional airlines arises primarily from the high cost of fuel, low demand, and the precariousness of airport infrastructure.

According to Baker et al. (2015), there is short-term and long-term causality between regional aviation and economic growth. In this context, despite the importance of the aviation sector to the Brazilian economy, the reality of the country is characterized by a disparity in the flights offered in its 27 federative units. The greatest deficit is found in the Northeast and North regions of the country.

'Regarding the history of Brazilian regional aviation, in the 1950s, the regional market served over 350 cities, whereas currently, this number has been reduced to approximately 100 locations. One of the factors contributing to the decline of regional routes was the regulatory flexibility associated with the lack of a national policy to sustain this type of operation by airlines (SAMPAIO, 2019).

In order to improve the context of regional aviation, the Brazilian government launched the Regional Aviation Development Program (PDAR) in 2014. PDAR aimed to ensure that 96% of the Brazilian population was within 100 km of an airport with regular flights. Additionally, the program intended to subsidize airlines that operated regular routes between regional airports. Despite the high expectations of airlines and aircraft manufacturers, PDAR was never regulated by the Secretariat of Civil Aviation (SAC) and was suspended by the government in June 2015, due to fiscal adjustment measures.

In the current scenario in Brazil, the sector has undergone several changes with airport concessions, where studies indicate that airports under concession or imminent to this change, now have a greater potential for demand. However, even with the concessions, apparently, regional aviation did not follow this increase. In addition, there is the COVID-19 pandemic, where the air transport sector was one of the most affected sectors. It is in the face of such a situation that this research proposal is inserted. Its main question is: To what extent can a business model help the regional aviation sector in Pernambuco?

BIBLIOGRAPHIC REVIEW

The concept of a business model does not have an exact definition, as there are various definitions of the term in the literature. According to Teixeira and Lopes (2016), a business model consists of a variety of elements such as products, suppliers, customers, among others. Therefore, the model will not depend strictly on its components, and this results in a multiplicity of configurations, making it so that there are no standardized business models. In this study, the concept used will be that of Osterwalder and Pigneur, and their approach will be utilized in the research methodology.

According to Osterwalder and Pigneur (2011), a business model

describes the logic of how an organization creates, delivers, and captures value. It should be easy to describe and facilitate discussion. The authors point out that the challenge is to keep the model simple, relevant, and intuitively understandable while not oversimplifying the complexity of how their businesses operate.

The model produced by the authors, known as the Business Model Canvas, is divided into 9 blocks. These nine blocks are: Customer Segments, Value Proposition, Channels, Customer Relationships, Revenue Streams, Key Resources, Key Activities, Key Partnerships, and Cost Structure.

The Customer Segments block defines the different groups of customers that the company reaches and serves. This block is responsible for generating revenue for the company. The Value Proposition block describes the products and services that will be used by customers. The Channels block describes how the company communicates with customers to deliver its products. The Customer Relationships block describes how the company will interact with the Customer Segments. The Revenue Streams block, as the name suggests, pertains to the portion of revenue the company generates, which can take various forms such as product sales, loans, and advertising, for example.

The blocks explain how the Value Proposition is created: to produce products/services, necessary resources, strategic partnerships to fulfill the Value Proposition, and finally, to have an associated Cost Structure. First, there is the Key Resources block, which encompasses the resources that make the model work, which are crucial for creating the Value Proposition and also for maintaining and reaching new customer segments to generate revenue.

The Key Activities block describes the activities that must be performed to produce and deliver the Value Proposition; these activities can include production, problem-solving, and platform-related tasks, for example. The Key Partnerships block represents the company's partnerships in the business. Lastly, there is the Cost Structure block, which shows the costs of the business operations.

The economic deregulation of airlines has produced challenges for the airport industry. With increased competition, lower fares, and consequently increased demand, pressure has been placed on existing airport infrastructure. Therefore, airports need to not only serve airlines' airside services but also consider other activities to attract new services while maintaining a high level of service and low operating costs to compete with other airports and transportation modes (Bettini and Oliveira, 2016).

Bettini and Oliveira (2016) also emphasize that airports need to add value to two different customer groups now: the airlines and the passengers, where the airport would be considered a "two-sided platform." In the airport context, this means that airlines benefit from increased passenger numbers, and passengers benefit if the airport attracts more airlines, leading to more destinations and flight frequency.

Given these changes in the airport business perspective, concessions and privatizations are being used as tools not only for financing but also for improving airport management to adapt to such changes. In this changing landscape, Qin (2010) analyzed different business models concerning airport ownership.

However, Qin (2010) describes that the traditional model of airport business worldwide, where the airport is controlled and operated by the local or national government, is still common, especially in the Asia-Pacific, Africa, and Latin America regions. The reason

for sticking to this business model lies in emphasizing the airport's role as part of public administration. In this model, commercial practices are not prioritized.

Among the benefits of this model, the author points out that the airport can receive subsidies to meet social objectives and enjoy certain privileges, such as exemption from certain laws or regulations. On the downside, the objectives given to airports are not well-defined and tend to change with political shifts, resulting in inefficiency.

Another business model is the Public-Private Partnership (PPP), which is similar to the privatization model. PPP involves cooperation between the public and private sectors, based on the specialization of the private partner that best serves clearly defined public needs through the allocation of resources, risks, and rewards. This model has advantages such as high productivity, fast project delivery, and greater customer focus. However, its disadvantages include a stronger focus on economic aspects rather than social and environmental concerns, as well as the transfer of risks from the private sector to the public sector.

Finally, concerning different airport ownership models, there are privatizations. In a simplified manner, privatization involves transferring airport ownership to the private sector. The benefits include the airport's ability to seek new revenue from the private market, raising more capital, aiming for improved efficiency, cost reduction, focusing more on customers, enhancing competition among airlines, and reducing costs for passengers. Among the disadvantages highlighted by the author is that without government presence, privatization may lead to higher fees for airlines and passengers, resulting in increased ticket prices.

Given the above information about the models, Qin (2010) concludes that airports should adopt business models based on their objectives, and each situation should be evaluated individually. The author also suggests some questions to help in choosing the model, considering that all models have both positive and negative aspects. Some of the questions include: What objective is the airport trying to achieve? What are the costs, benefits, and impediments if the private sector is introduced to the airport? How to balance the interests of the public and the private sector?

Regarding the application of the business model, a study conducted by Kalakou and Macário (2013) explores different types of business models. The definition and methodology proposed by Osterwalder and Pigneur are used in the study, which, according to the authors, can capture both the operation and the environment in which the company exists.

The airports under study were organized into five categories based on Jarrach (2001), and the definition is presented in section 3.2. This criterion allowed for the comparison of the respective business models and the exploration of practices that can support the business model. Twenty airports were analyzed, and their respective categories are:

- Primary Hub: Frankfurt, London-Heathrow, Paris–Charles de Gaulle (CDG)
- Secondary Hub: Vancouver, Changi, Schiphol
- Regional/Business Airports: Le Bourget, Lyon, Antwerp, London-City, Farnborough
- Low-Cost Airports: Bergamo, Charleroi, Ciampino, London-Luton, Liverpool, Gatwick
- Cargo Airports: Liege, Leipzig, Châlons Vatry

The analysis consists of two parts. Firstly, a reference airport is assumed for each category. The second step involves comparing each reference

airport with the other airports in its category, identifying common characteristics and differences. It is expected that, after this process, the airport can use such comparisons to improve based on the reference airport in its category. The research points out that regional business airports do not show homogeneity in their operation.

Another study following a similar approach to the one conducted by Kalakou and Macário (2013) is the study by Santos (2017), which uses the same Osterwalder and Pigneur model to group airports that have similarities. The difference from Kalakou and Macário's study is that this study uses variables based on the literature to determine airport classifications into groups. Twenty-six variables were used to assess a sample of 40 airports. The sample consists of airports from 27 countries, with 25 belonging to the European Union, and Norway and Switzerland being the other two countries. Figure 6 presents the variables used in the research.

In terms of methodology, a univariate statistical analysis was first conducted to gain an understanding of the collected data. Subsequently, a factor analysis and a cluster analysis were performed.

As a result, the study presents business models corresponding to each of the identified groups in the Cluster method.

With the aim of studying regional aviation in Pernambuco, this section seeks to characterize the airports that make up the state's regional aviation. Airports will be considered based on the classification of the National Aeroviation Plan and their classification as primary regional, secondary regional, or complementary network. These airports will be the objects of study for proposing measures in their business models.

Therefore, the airports are: Senador Nilo Coelho Airport (SBPL) in Petrolina-PE, Santa Magalhães Airport (SNHS) in Serra Talhada-PE, Oscar Laranjeiras Airport (SNRU) in Caruaru, and Fernando de Noronha Airport (SBFN). Senador Nilo Coelho Airport will not be considered in the analysis because it is being managed by CCR Aeroportos (Concession), and the focus of the study is to analyze airports managed by the government.

METHODOLOGY

The first step in the methodology applied to achieve the objective of proposing a business model for regional aviation was to search the literature referring to the subject to be used as a base study for the research. The studies used as a basis were Santos (2017) and Kalakou and Macário (2013), where the variables and methods applied are based on these studies.

The data and information collected were based on the classification of the National Airplane Plan. All airports classified as primary regional airport (A), secondary regional airport (B) and complementary network were considered. The objective is to be able to characterize the country's regional aviation and use such data for future comparison and thus help in the proposal of a business model. To identify the airports, the Horus platform of the National Civil Aviation Secretariat was used. A total of 185 airports were identified, thus comprising the initial sample.

Once the initial sample is known, the next step of the methodology consists of applying the Cluster method, with the aim of classifying the airports in the sample into groups, considering a set of variables that reflect the airport business models, so that later it can be proposed a business model. The first stage of the Cluster analysis takes place in the choice of variables. The choice was based on

characteristics of the business model of an airport applied to the business model of Osterwalder and Pigneur.

First, we have the variables related to the identification of the airports. The variables are: Name - referring to the airport's name, State and City - referring to the location of the airport within Brazilian territory, Abbreviation - referring to the ICAO code of the airport, and finally, the Classification variable, which indicates the categorization of the airport according to PAN (Complementary Network, Primary Regional, Secondary Regional).

The second group of variables corresponds to the airport's infrastructure. The variables are: Runway Quantity - the number of runways at the airport, Width - the width of the main runway, Length - the length of the main runway, Pavement - the type of pavement used on the runway, and finally, the measurements of the Passenger Terminal - TPS and the Aircraft Apron - Apron.

The third group of variables is related to the airport's operation. The variables are: Operator - Referring to who operates the airport (Municipality, State, Private Initiative - Concession), Navigation Aid - Refers to whether the airport operates during daytime and/or nighttime and IFR (Instrument Flight Rules) and/or VFR (Visual Flight Rules), Aircraft - Refers to the aircraft operating at the airport, Airlines - Which airlines operate at the airport, Quantity of Airlines - the number of airlines operating at the airport, and finally, Number of Destinations - refers to the number of destinations available from the airport.

The fourth group of variables corresponds to the economic aspect of both the city and the costs presented at the airport. Concerning the city, there is the GDP (Gross Domestic Product) per capita for the years 2019 and 2020, as these years were chosen due to data availability, considering that data for 2021 and 2022 have not been published yet. Regarding the airport, the following variables are included: Real Average Airfare for the years 2019, 2020, and 2021, referring to the average amount charged by airlines at the airport, Real Yield - Minimum and Maximum for the years 2019, 2021, and 2022. Yield represents the amount charged per kilometer traveled, indicating how much passengers paid for each kilometer they traveled. The minimum and maximum values of the variable were adopted to better understand the context in which the airports are operating.

The fifth group of variables pertains to the airport's movement. The variables in this group refer to aircraft movement, cargo, and passengers. They include: Passengers, Aircraft, and Cargo for the years 2019, 2021, and 2022.

Regarding the variables related to the airport in the fourth group and the variables in the fifth group, the year 2020 was excluded due to the significant impact of COVID-19 on aviation. Therefore, this year was not considered in the analysis, as most airports did not operate during that period.

With the assistance of the previously obtained results, particularly the knowledge of airports within the cluster group, and considering the characteristics of regional airports presented in the literature, it is possible to outline guidelines aimed at improving the airport business model.

RESULTS

The following analysis corresponds to Cluster analysis. In the use of the k-means method, the choice of the number of clusters is based on the author's criteria. Given the operational alternation, the cluster related to the year 2022 was adopted in order to understand the most recent operational context and where most airports showed activity. The

number of chosen groups was 3 groups. The Table 1 shows the clusters from the Pernambuco airports.

Table 1 - Cluster - Pernambuco Airports

Airports	*Cluster*
AEROPORTO SENADOR NILO COELHO	3
AEROPORTO SANTA MAGALHÃES	2
AEROPORTO OSCAR LARANJEIRAS	2
AEROPORTO DE FERNANDO DE NORONHA	3

Group 1 generally represented the group with the largest operational and infrastructure size, including the presence of international airports, and mainly consisting of concessioned airports. This group does not include any of the Pernambuco airports.

Group 2, composed of 48 airports, included Airport Oscar Laranjeiras and Airport Santa Magalhães. This group showed the smallest operational size among the analyzed groups and the highest operational variation (airports that either ceased operations or began operations within the analyzed period). The largest group was Group 3, composed of 68 airports, which included Fernando de Noronha Airport. This group exhibited intermediate operational characteristics among the analyzed groups. Additionally, this group stood out with the presence of 18 concessioned airports, highlighting the interest in concessions not being limited to larger airports like those in Group 1.

Pernambuco airports had lower passenger numbers compared to the group's average, but they had aircraft movement roughly twice as high as the group's average. In terms of passengers, this indicates two possibilities: operation with smaller aircraft or low aircraft occupancy rates.

Considering the similarity in terms of infrastructure, except for the Serra Talhada Passenger Terminal, it is evident that within the group, both airports stand out in terms of cargo but lag in terms of passengers. Solutions such as reducing fares through subsidies to airlines or residents can be used to ensure higher passenger traffic.

The airports studied in Group 2 stood out positively in terms of cargo compared to the group and their benchmarks, highlighting the economic potential of the region where Airport Oscar Laranjeiras and Airport Santa Magalhães are located. On the negative side, there is a significant difference when it comes to passenger movement. Initiatives such as subsidies, operations by other airlines, and the addition of new routes are possible measures to increase passenger demand and ensure competitiveness in these regions.

In Group 3, the Pernambuco airport excelled in all aspects related to movement, with superior potential in passengers and cargo, especially. It also stands out for having inferior infrastructure in terms of dimensions, indicating the airport's operational efficiency when compared to the group's average.

In the analysis of Group 3, Fernando de Noronha Airport stood out in all operational aspects related to movement. The negative aspect found in the comparison for the airport was its high tariff, which is due to factors such as the distance from the airport's sole operation. Additionally, when compared to the group and benchmark airports, Fernando de Noronha Airport has only one destination served by a single airline. The addition of new routes and airlines may be important for ensuring competitiveness and, consequently, a possible reduction in tariffs.

Overall, the three airports analyzed through clustering showed the absence of social networks and an

official airport website. These aspects are important for presenting the airport and the attractions of the cities they are located in. Furthermore, considering the trend in the larger group and the recent rounds of Brazilian airport concessions, these airports can be grouped for future rounds.

Highlighting the airports within group 1 in terms of the Operator aspect, the three previously analyzed airports in Pernambuco could be grouped for future airport concessions. To attract the concession, it is suggested to include, for example, one of the airports that have not yet been concessioned in group 1, such as Macapá International Airport. Ideally, the concession could be awarded to one of the operators that currently operate one of the airports in the Northeast, aiming for better commercial connectivity among these airports.

When comparing the characteristics of the business model as presented in the literature, Santos (2017) and Kalakou & Macario (2013), it is noteworthy that other services are present, such as aircraft maintenance, charter services, exhibition events, and flight schools, in addition to partnerships with city hotels. Therefore, guidelines aimed at expanding services at the airports are essential. This includes the presence of aircraft maintenance facilities, flight schools, and partnerships with hotels, all of which are important aspects that can be implemented at the airports in Pernambuco.

Regarding the airports in Garanhuns and Araripina, due to their recent operation and operational values, the characteristics of group 2 stand out. Investments in infrastructure are crucial for these airports, along with the creation of an official website and social media presence, enabling the local population to learn not only about the airport but also about the regional characteristics of the city.

Unlike the other airports and their recent operation, it is recommended to operate these airports under government ownership to ensure connectivity not only to Recife Airport but also to other airports such as Campina Grande and Petrolina. Considering Azul's operation in other regional airports in the state, it is advisable to seek a partnership with the airline to ensure the continuous operation of the airport.

CONCLUSIONS

Overall, the Pernambuco airports presented interesting characteristics, and with incentives focused on their economic and social development, such infrastructures become important for the development and regional connectivity of the state of Pernambuco.

As presented throughout the research, the difficulties in the study arose from the lack of data concerning regional airports, where fundamental aspects for the airport business model such as costs and revenues were not addressed. Given that the National Aviation Plan is being reformulated, these aspects are crucial for studying the situation of regional airports and should be addressed in the reformulation.

Additionally, the study emphasizes the importance of studying regional airports in terms of their financial profitability and attractiveness to the society in which they are located. In light of the absence of cost and revenue data, it is recommended for future studies to propose financial simulations of regional airports, allowing for a comprehensive understanding of the situation

REFERENCES

Banker, R. D.; A. Charnes e W. W. Cooper (1984). Some models for estimating technical and scale inef7iciencies in data envelopment. Management Science, v. 30, n. 9. DOI: 10.1287/mnsc.30.9.1078

BETTINI, Humberto FAJ; OLIVEIRA, Alessandro VM. Two-sided platforms in airport privatization. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 93, p. 262-278, 2016.

CHWIŁKOWSKA-KUBALA, Anna. What are the sources of regional airport economic effectiveness? The dynamic capabilities perspective with evidence from Poland. Journal of Air Transport Management, v. 92, p. 102024, 2021.

JARACH, David. The evolution of airport management practices: towards a multi-point, multi-service, marketing-driven firm. Journal of air transport management, v. 7, n. 2, p. 119-125, 2001.

KALAKOU, Sofia; MACÁRIO, Rosário. An innovative framework for the study and structure of airport business models. **Case Studies on Transport Policy**, v. 1, n. 1-2, p. 2-17, 2013.

Qin, Z., 2010. Comprehensive Review of Airport Business Models. Airports Council, International.

Sampaio, A. P. A. Estimativa de demanda por transporte aéreo para apoio ao programa de desenvolvimento da aviação regional no nordeste do brasil. Dissertação do Programas de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

Santos, D. F. dos. Análise aos modelos de negócio de aeroportos – Caso de estudo da Europa. Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da Escola Técnico Lisboa, 2017.

Osterwalder, A. & Pigneur, Y., 2011. Business Model Generation. Rio de Janeiro: Alta Book.

TEIXEIRA, L. C. M.; LOPES, Humberto Elias Garcia. Aplicação do modelo canvas para o modelo de negócios do Banco do Brasil e da Caixa Econômica Federal. Revista Gestão & Tecnologia, v. 16, n. 2, p. 73-99, 2016.

DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROCESSAMENTO DE CANAL DE INSPEÇÃO DE PASSAGEIROS POR NÍVEL DE SERVIÇO EM AEROPORTOS: UM ESTUDO DE CASO.

Wilson Rocha Gomes

e-mail: wilson_rocha_gomes@hotmail.com

PAPER ID: SIT2177

ABSTRACT

Airport terminals have operational processors that are sensitive to flight dynamics and passenger flow. When not correctly sized or under pressure from demand, a low level of service to passengers may occur. The objective of this article was to identify the processing capacity of an inspection channel of a domestic airport with processing of more than 5 million passengers a year. The case study methodology was used through observation and direct counting of the processing of passengers, crew and employees at the check-in counters, access control and inspection channel at intervals of 10 minutes. The sample considered 12,840 people, being statistically representative in relation to the airline network in force in the reference month, declared peak hour and commercialized seats, with 95% reliability and margin of error of 0.82%. Considering the prospect of a better level of service for passengers, and as the main contribution of this study, it is suggested to adopt the third quartile of the statistical sample as a reference for the level of service and productivity of an inspection module. Thus, although the maximum capacity found for the inspection channel composed of five modules was 935.50 passengers per hour, which is equivalent to 194.7 passengers per module per hour, it is suggested to use the value found in the third quartile, which was 162.5 passengers per module every hour.

Keywords: Airport, capacity, inspection channel, level of service, passengers.

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios na fase de planejamento e construção de aeroportos é de se definir as capacidades de seus processadores operacionais. Nessa perspectiva, dentre as responsabilidades do operador aeroportuário está a emissão regular de declaração de capacidade aeroportuária, que conterá os parâmetros de coordenação relativos aos componentes pista, pátio e terminal (ANAC, 2022).

Não obstante, a eficiente operação desses componentes está atrelada, dentre outros aspectos, à malha aérea em vigor no aeroporto no período de referência, com influência direta na experiência do passageiro que se utiliza dessa infraestrutura.

No componente Terminal, um dos processadores aeroportuários mais sensíveis à a dinâmica dos voos e as movimentações dos passageiros é o canal de inspeção. De acordo com ANAC (2023), a finalidade desse processador, composto por equipamentos e pessoas, é de se evitar a introdução de armas, explosivos, artefatos ou substâncias e materiais proibidos na área restrita ou estéril de um aeroporto.

No entanto, o desbalanceamento da capacidade de processamento de um canal de inspeção (composto por um ou mais módulos de inspeção) em relação à malha área programada num determinado aeroporto pode acarretar a formação de filas excessivas, o que na perspectiva do passageiro, indicaria um baixo nível de serviço.

De acordo com a IATA (2004), o nível de serviço de atendimento aos passageiros está relacionado com a habilidade de atender a demanda, tantos nos aspectos quantitativos como nos qualitativos, como conforto e conveniência. Para a ANAC (2018), a relação capacidade-demanda-nível de serviço deve estar continuamente gerenciada e balanceada.

Logo, a pergunta que se deseja responder nesse trabalho é de como atingir um nível adequado de serviço desse componente, de forma que os usuários não sejam expostos a filas excessivas em Terminais aeroportuários - algo bastante comum em diversos aeroportos brasileiros.

Portanto, o presente estudo tem como objetivo identificar a capacidade de processamento de um canal de inspeção doméstico de um aeroporto com processamento no ano de referência superior a cinco milhões de passageiros.

Para melhor atender a finalidade desse estudo, os horários reais de operação dos voos foram suprimidos, mantendo-se somente a alocação desses voos no intervalo de tempo selecionado.

2. METODOLOGIA

Utilizou-se a metodologia de estudo de caso por meio de observação e contagem direta (BARBETTA, 2004; HUBBARD, 2015), do processamento de passageiros, tripulantes e empregados nos balcões de *check-ins*, controle de acesso e canal de inspeção. Os observadores utilizaram, além da observação direta, o uso de câmeras e o registro de contagem dos pórticos de detecção dos módulos de inspeção.

Os pórticos de detecção (SMD 600 *Multi-zone*) são de alta precisão e rendimento, possuindo contagem automática de pessoas que passam pelo ponto de acesso em ambos os sentidos.

As observações foram realizadas durante 8 dias escolhidos aleatoriamente no mês de referência, por um período de 3 horas ininterruptas em cada um desses dias. Esse intervalo horário, dentro de uma janela diária de 24 horas de operação do processador canal de inspeção, representou percentualmente a maior concentração do número de decolagens e de embarque de passageiros, com base na malha área em vigor para o mês de referência desse estudo.

Os dados obtidos foram tratados e analisados por intermédio do *software Statistical Packege for Social Science for Windows* (SPSS), desenvolvido pela empresa IBM.

2.1. Composição da amostra

A composição da amostra se deu pelo somatório dos passageiros, tripulantes e empregados que passaram pelo canal de inspeção durante os dias e respectivos

intervalos de observação. O canal de inspeção continha cinco módulos de inspeção de passageiros em operação. Tomou-se como referência a malha aérea contida no Horário de Transporte (HOTRAN) em vigor para o aeroporto de estudo, considerando somente os horários programados de decolagem.

Em cada um dos dias de observação ocorreram no mínimo 11 voos, e no máximo 13 voos. A observação dos processadores iniciava 50 minutos antes do primeiro voo previsto em HOTRAN, finalizando 10 minutos após o horário de decolagem do último voo.

As medições foram realizadas em intervalos de 10 minutos, perfazendo-se 18 medições por dia de cada um dos processadores (balcão de check-in, controle de acesso e canal de inspeção), totalizando dessa forma 3 horas de observação diária.

Ao final do estudo obteve-se o total de 144 medições da amostra, compreendendo 24 horas de observação, com 12.840 passageiros, tripulantes e equipes de serviço passando pelo processo de inspeção no canal de inspeção.

A amostra é estatisticamente representativa para o mês de referência do estudo em relação a hora pico declarada, malha de voos em vigor, e respectivos assentos comercializados, com 95% de confiabilidade e margem de erro de 0,82%.

2.2. Distribuição qualitativa da amostra

Do total de pessoas que passaram pelo canal de inspeção (12.840), os passageiros representaram 91,39%. Observou-se que o grupo de tripulantes e empregados do aeroporto representaram 8,61% do total, que 8,65% do total de pessoas passaram pelo menos uma segunda vez pelo módulo de inspeção (portavam objetos metálicos), e que 2,34% das pessoas foram aleatoriamente selecionadas para o procedimento de busca pessoal (tempo médio de processamento de 2,5 minutos com passageiros com 1 pertence de mão e 4 minutos com passageiros com dois ou mais pertences de mão).

3. RESULTADOS

3.1. Canal de Inspeção

Apresenta-se na Tabela 1 o resumo da estatística descritiva da amostra referenciada

Tabela 1 Estatística descritiva inicial

Estatística Descritiva	
N	144
Mínimo	3,00
Máximo	179,00
Média	89,139
Desvio Padrão	48,36062
Variância	2338,750
Assimetria	0,269
Curtose	-1,114

No total de 144 medições (em intervalos de 10 minutos) passaram 3 pessoas no menor intervalo e 179 no maior intervalo nos módulos de inspeção, o que demonstrou uma grande variação na amostragem.

Ao se considerar os valores encontrados para a média (89,19), o desvio padrão (48,36), assimetria (0,269) e curtose (-1,11) pode-se inferir que a distribuição das frequências foi do tipo normal (Gaussiana), com curtose platicúrtica (distribuição mais achatada que uma destruição normal, com $b_2<0$), devidamente representada na Figura 1.

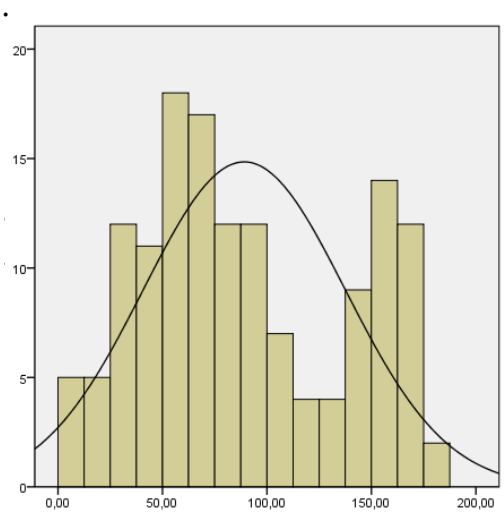


Figura 1 Distribuição das frequências.

Em função da grande variação (amplitude) encontrada em relação às frequências mínima, máxima, média e desvio

padrão, realizou-se uma 2ª análise estatística, priorizando os voos com horários próximos ou simultâneos, o que resultaria em maior utilização dos processadores.

Nesse recorte utilizou-se as medições do intervalo entre 00:00h e 02:00h, totalizando 7 medições por dia, e no total de 56 medições da amostra, conforme apontado na Tabela 2.

No total de 56 medições (em intervalos de 10 minutos) passaram 50 pessoas no menor intervalo e 179 no maior intervalo nos módulos de inspeção, o que demonstrou uma menor variação da amostragem, quando comparado à totalidade da amostra

Tabela 2 Estatística descritiva – 2º recorte

Estatística Descritiva	
N	56
Mínimo	50,00
Máximo	179,00
Média	139,089
Mediana	149,500
Moda	158,000
Desvio Padrão	29,96439
Variância	897,865
Assimetria	-1,149
Curtose	0,718

Ainda, o aumento da média (139,08) e diminuição do desvio padrão (29,9) apontaram que as frequências ficaram mais centralizadas, o que também é referenciado pelo valor de 0,71 da curtose (Leptocúrtica com b_2 >0), mas com assimetria negativa, conforme demonstrado na Figura 2.

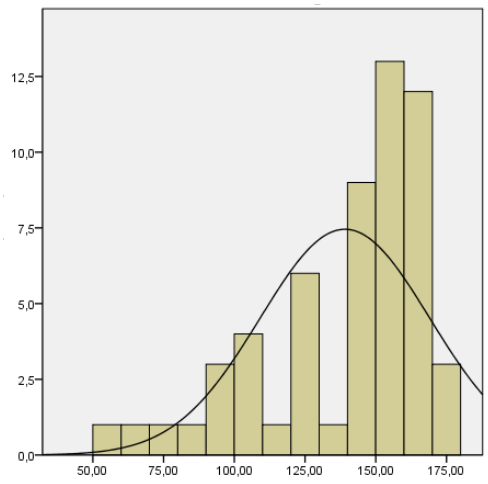


Figura 2 Distribuição das frequências com base no novo recorte estatístico.

Esse recorte estatístico sugeriu melhor representar o intervalo de tempo onde o canal de inspeção foi mais requerido por produtividade (em função da convergência da Curva de distribuição normal e curtose positiva).

Com base nessa evidência, e considerando que a capacidade do processamento do canal de inspeção tem um caráter dinâmico, aplicou-se o método estatístico de distribuição por quartis, aplicando o 3º quartil da distribuição (onde 75% dos dados são menores que ou iguais ao valor do quartil), obtendo-se os resultados descritos na Tabela 3.

Tabela 3 Estatística descritiva – Quartis

Estatística Descritiva		
N		56
Percentis		50,00
	25	121,2500
	50	149,5000
	75	162,2500

O valor do terceiro quartil representa, em relação a amostra, que 162,25 pessoas passaram nos módulos de inspeção num intervalo de 10 minutos, o que ficou próximo da Mediana (149,50) e Moda (158,00), sugerindo mais uma vez uma convergência para a distribuição normal das frequências.

Considerou-se nesse estudo, portanto, o valor do terceiro quartil como referência de nível de serviço e de produtividade de um módulo de inspeção.

Nesse recorte também estão computadas as especificidades da amostra que impactaram diretamente na produtividade do canal de inspeção (grupo de tripulantes e empregados, dupla inspeção e busca pessoal).

3.2. Check-in

O processo de *check-in* presencial inicia quando o passageiro se apresenta junto aos balcões das companhias aéreas para a confirmação de sua identidade, despacho de bagagens e emissão do cartão de embarque. Por outro lado, quando da realização do *check-in online*, a apresentação do passageiro pode ser feita diretamente no canal de inspeção, passando anteriormente pelo controle de acesso. A confirmação da identidade e eventuais despachos de bagagens permitidas são realizadas diretamente no portão de embarque, já dentro da sala de embarque.

Constatou-se no estudo que 31% do total da amostra optou pelo *check-in online*, tendo se dirigido diretamente ao controle de acesso.

No entanto, encontrou-se evidências que o processamento de passageiros nos *check-ins* presencias combinados com os passageiros de *check*-in *online* superaram por intervalo de tempo o valor de referência de nível de nível de serviço e de produtividade (3º quartil) do canal de inspeção, o que na prática se concretizou na formação de filas na área do saguão.

O recorte apresentando ocorreu no dia 3, no intervalo de medição entre 1h10min e 1h20min, onde estavam ativados e operando 100% dos balcões *de check-in* presencial. A evidência aponta que nesse intervalo o número de passageiros processados nos *check-ins* presenciais (146 passageiros) foi maior que o número de processamento no canal de inspeção (122 pessoas), acarretando formação de fila para fora do controle de acesso.

3.3. Controle de acesso

A área de controle de acesso pode ser caracterizada nesse estudo como as áreas disponíveis para a formação de fila, que se estendem internamente entre esse ponto de controle de acesso até o canal de inspeção, e externamente do mesmo ponto em direção ao saguão de embarque - área pública.

Ao se considerar o mesmo recorte estatístico anteriormente detalhando em relação ao processador *check-in* (dia 3, intervalo de medição entre 1h10min e 1h20min), constatou-se formação de fila tanto internamente quanto externamente ao controle de acesso, com o total de 213 passageiros.

O tempo médio de espera por passageiro para iniciar o procedimento de inspeção no canal de inspeção foi de 11 minutos. Para a ANAC (2018), situações como essa sugerem uma degradação do nível de serviço, onde a demanda exigiu um nível de serviço que não foi atendido devido a uma restrição operacional.

4. CONCLUSÕES

Demonstrou-se nesse estudo em relação ao componente Terminal de Passageiros, a partir de uma amostra estatisticamente representativa, que os processadores *check-in*, controle de acesso e canal de inspeção, em função das características dinâmicas de alocação dos voos e fluxo de passageiros, precisam estar balanceados e com capacidade adequada para atender a demanda prevista.

As medições, em intervalos de dez minutos, tiveram o objetivo de melhor elucidar a dinâmica do fluxo de passageiros, tripulantes e empregados do aeroporto.

A capacidade máxima aferida de processamento de cada módulo de inspeção no presente estudo de caso foi de 194,70 passageiros por hora, considerando-se um canal de inspeção composto por 5 módulos.

No entanto, o 3º quartil da distribuição amostral foi tomado como referência para a determinação de capacidade do canal de inspeção. O objetivo é proporcionar um melhor nível de serviço ao passageiro, inclusive com respectiva redução do tempo de espera em filas de pré-embarque.

Eis, portanto, a principal contribuição desse estudo para o setor aeroportuário, que é de se apresentar uma metodologia com abordagem qualitativa e quantitativa para a determinação da capacidade de um canal de

inspeção com foco em nível de serviço ao usuário.

Sugere-se em estudos futuros que essa metodologia seja replicada em mais aeroportos, de igual ou maior complexidade operacional, de forma a validar como método a métrica estatística utilizada, bem como a utilização de *softwares* de simulação de capacidade aeroportuária para orientar realocações físicas dos processadores.

Eventuais limitações referentes a mobiliário, ergonomia, disposições físicas dos processadores e dinâmica da fila não foram consideradas nesse estudo.

5. REFERÊNCIAS

ANAC (2018). *Agência Nacional de Aviação Civil. Manual de elaboração e apresentação de planos de Gestão da infraestrutura – PGI. Acesso em 03 de junho de 2023. Fonte:* https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/concessoes/documentos-d e-apoio-ao-concessionario/manual-pgi-07-17.

ANAC. (2022, Jun 07). *Agência Nacional de Aviação Civil. Resolução 682: Regulamenta a coordenação de aeroportos e dispõe sobre as regras de alocação e monitoramento do uso da infraestrutura aeroportuária.* Acesso em 03 Jun 2023. Fonte: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2022/resolucao-682

ANAC. (2023, Jan 30). *Agência Nacional de Aviação Civil. Resolução 701: Aprovação a Emenda 08 do RBAC 107 – Segurança da Aviação Civil Contra Atos de Interferência Ilícita.* Acesso em 05 Jun 2023. Fonte: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2023/resolucao-701.

Barbetta, P. A. *Estatística Aplicada às Ciências Sociais*. 5 ed. Florianópolis: Editora da FUSC, 2004.

Hubbard, Douglas W. *Como mensurar qualquer coisa encontrando o valor do*
que é intangível nos negócios. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2015.

IATA (2004, Jan) *International Transportation Association. Airport Development Reference Manual*, (9th).

EFFECTS OF AIRPORT MOVEMENTS ON TAXI-IN AND TAXI-OUT TIME

Alexandre Pinchemel, Mauro Caetano, Evandro José Silva
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

*** Corresponding author e-mail address**: alexandreintl@hotmail.com

PAPER ID: SIT2211

ABSTRACT

Aircraft movements resulting from landing, take-off, and taxi operations are a determining factor for airport capacity. To enhance ground traffic management efficiency and gain a more precise understanding of factors influencing taxi times, it is imperative to obtain more accurate taxi time predictions. However, Exploring the extent to which aircraft arrivals and departures at an airport can disrupt taxi times and lead to practical consequences remains little explored. This paper utilizes real data from prominent Brazilian airports with substantial traffic to assess the impact of airport movements on taxi times, both for taxi-in and taxi-out. A regression analysis has been applied to evaluate significant variations across ten Brazilian airports during the peak months of July, August, and December 2022, when aircraft movements were at their highest. The results demonstrate alterations in taxi times at the airports under examination. For instance, at Porto Alegre Airport, each departing aircraft extends the ground taxi time by 1.10 minutes for other moving aircraft. Similarly, at Salvador Airport, each arriving aircraft can increase the taxi time for a taxiing aircraft by 0.25 minutes. In the case of taxi-out operations, every arriving aircraft increases the taxi time by 0.57 minutes at São Paulo - Congonhas Airport and at São Paulo - Guarulhos Airport, every departing aircraft increases the taxi time for another taxing aircraft by 0.32 minutes. Therefore, addressing the impact of air movement at airport can provide valuable insights and facilitate the development of strategies aimed at mitigating taxi times.

Keywords: Aeronautics infrastructure, Air transport, Operational efficiency

ACKNOWLEGDEMENTS

The Authors would like to thank Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

2. INTRODUCTION

Taxi time management is one of the main indicators to assess the operational efficiency of an airport, so that additional surface movement times can generate a bottleneck in air operations. In airports where air traffic reaches or nearly reaches maximum airport capacity, it can cause delays and long taxi times, as well as reduce the availability of circulating aircraft (Li et al, 2020).

It is estimated that 10-30% of total flight time is spent while taxiing in Europe (Simaiakis and Balakrishnan, 2009). The taxiing procedure applies along the path of an aircraft from the gate to the runway threshold or vice versa. However, many times this trajectory may exceed the expected taxi operating time due to several factors, such as severe meteorological events (Cheng et al., 2019; Zou et al., 2018), airport terrain uncertainties, airport layout, infrastructure, airport capacity (Park and Kim, 2023; Wang et al., 2021a) and other unpredictable factors.

The implementation of surface traffic management can improve air operations, avoiding undesirable problems such as congestion (Murça, 2017). In addition, the ability to predict phenomena that affect taxi times variability allows avoiding stop-and-go situations, reducing queues and minimizing the additional effort required from controllers to avoid waste and ensure operational safety, as mentioned by Nikoleris et al. (2011).

By analyzing the causes and seeking solutions to reduce additional taxi time, efforts are being made to improve the predictability and efficiency of air operations through the reduction of congestion on taxiways and optimization of travel times. Additionally, this approach aims to minimize environmental impacts, with the reduction of carbon emissions, thus making the aeronautical industry more efficient and responsible, according to the research by Postorino et al. (2019).

Understanding additional taxi time is the first step to optimize taxi time, reducing waiting times, decreasing fuel consumption, and enhancing predictability in airport operations. By comprehending the time wasted in ground traffic at an airfield enables the implementation of strategies to improve overall efficiency. This step aligns with the objective of this study, which is to investigate the variation of taxi-in and taxi-out time duration resulting from aircraft movement at airports. In this study, 10 Brazilian airports were selected to observe variations in taxi time.

3. THEORETICAL BASIS

Several existing studies on aircraft ground movement indicate that the main operational bottlenecks are primarily related to aeronautical infrastructure, including runway capacity, runway configurations and runway intersections (Park and Kim, 2023; Wang et al., 2021a, Ravizza et al., 2013). Various variables associated with taxi time for specific aircraft are discussed in the literature. These variables include weather factors (Park and Kim, 2023; Li et al, 2020), taxi distance (for taxi-in), instantaneous airport traffic flow (for taxi-out) (Jiao and Li, 2022; Li et al., 2020) and technical failures during flight departure, resulting in delays in arrival at the destination airport and therefore affecting airport capacity (Cheng et al., 2019).

Operations of landing, takeoff, and aircraft movement on the ground can restrict airport capacity and increase surface movement time. When using hierarchical regression to construct a predictive model of taxi time, Lordan et al. (2016) found that the expected taxi route to be traversed and factors influencing a quick departure (for landings), such as aircraft deceleration, and the runway (for takeoffs), including gate position and queues before takeoff, are directly related to taxi time. Using Cox regression, Diana (2013) demonstrates that gate departure delays and airport capacity availability impact taxi-out time in instrument meteorological conditions (IMC). In other words, there is approximately an 80% increase in taxi time for every 1% increase in airport capacity utilization.

Landing, takeoff, and aircraft surface movement operations can restrict airport capacity and increase surface movement time. Lordan et al. (2016) use hierarchical regression to construct a predictive model of taxi time and find that the expected taxi route and factors that influence a quick exit (for landings), such as

aircraft deceleration, and the runway (for takeoffs), including the position of the gate and queues before takeoff, are directly related to taxi time. Using a Cox regression, Diana (2013) demonstrates that gate departure delay and airport capacity availability affect taxi-out time under instrument meteorological conditions (IMC). In other words, there is an increase of about 80% in taxi time for every 1% increase in airport capacity utilization.

Ground movement is a determining factor for airport capacity. Zou et al (2018), using Monte Carlo simulation, predict the dynamics of aircraft movement on the ground in a real situation, using the concept of "Runway Exit Availability" (REA) and a two-stage scheduling strategy to deal with the problem of uncertain exits. The authors demonstrate an aggregate time saving of approximately 50% for departures and arrivals. However, they do not consider external factors that impact time, such as weather conditions and speed profiles in practice related to operational constraints.

Improving air operations management allows for efficiency gains in terms of time and minimization of environmental impacts, delays and unnecessary costs. With this objective, Simaiakis and Balakrishnan (2009) investigate the possibility of reducing fuel consumption and gas emissions in surface operations by reducing taxi time, through organizing aircraft in queues, as presented in Figure 1.

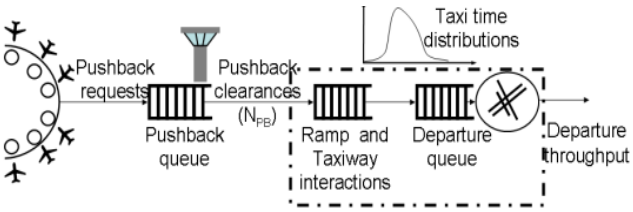


Figure 1: Controlled departure process. Source: Adapted from Simaiakis and Balakrishnan (2009).

According to Figure 1, the model proposed by Simaiakis and Balakrishnan (2009) uses gate-hold strategies to control congestion, with the aim of reducing taxi time. However, in this approach, the authors do not prioritize the pursuit of punctuality in operations, which is a relevant factor for airlines.

Regarding the motivations that cause inefficiencies in surface operations to achieve superior operational performance, Wang et al. (2021a) present the key-factors that affect taxi time in ground airport movements using a Random Forest prediction model. Using real data from three international airports (Manchester, Zurich, and Hong Kong) during the winter and spring months, the study reveals that the number of aircraft moving from pushback to the runway, the number of ground maneuvers, taxi distances over 500m, and the average speed of arriving and departing aircraft have an impact on taxi time.

In addition to these insights that affect aircraft taxi time prediction, Wang et al. (2021b) address the optimization of taxi time under uncertainty using the chance-constrained programming (CCP) model and propose a modified algorithm with a heuristic method that seeks the fastest route to simulate more efficient route allocation. The CCP model tested at Manchester Airport (MAN) in the UK proves to be efficient with fewer stops during the taxiing process, but it does not use real-time data in the simulations or address capacity bottlenecks during peak hours and heavy traffic.

There has been further research investigating the variation in taxi time. Ravizza et al. (2013) use a multiple linear regression approach to estimate factors that affect taxi time, revealing that taxi distance is related to aircraft speed, where arriving aircraft (taxi-in) have a higher speed compared to departing aircraft (taxi-out). Additionally, the turning angle was identified as a factor that contributes to reducing aircraft speed during taxiing. Aspects that cannot be easily explained, such as pilot behavior or airline standardization, also influence taxi time.

Predicting pushback time, taxi time, and runway utilization using deterministic optimization models proves to be a challenging task. Recognizing this limitation, Murça (2017) proposes a robust optimization approach that utilizes stochastic simulation of aircraft departure performance, taking into account the uncertainty of taxiing time. With this approach, it was possible to minimize surface congestion by establishing more

appropriate times for aircraft release from the gate in anticipation of potential surface delays.

Quantifying operational time presents challenges due to ongoing events in airport structures, such as truck traffic, de-icing processes, engine tests, and firefighting drills. These events generate variations in surface traffic time. As a result, the parameters adopted by the International Civil Aviation Organization (ICAO) to measure taxi time, fuel flow, and emission indices may be inconsistent and, in some situations, overestimated compared to actual operations. This discrepancy was observed by Xu et al. (2020), who modeled fuel consumption and emissions using real aircraft operational data at Shanghai Pudong International Airport during the taxi phase. It was found that taxi-out time is generally 35% longer, while taxi-in duration is closer to the operational time established by ICAO.

ICAO (2020) recommends that aeronautical operators measure taxi times for both taxi-in from the runway to the terminal and taxi-out from terminal to the runway. These measurements should consider wait times at the boarding gates, taxiway configurations, gate configurations and aircraft type.

An optimized approach that incorporates real airport data depicting how airport capacity affects taxi time is increasingly valued. There are various causal factors shown in the literature that interfere with taxi time, such as weather conditions, gate-to-takeoff delay, air traffic, airport congestion, and other factors that can result in increased taxi time. However, understanding how the movement of arriving and departing aircraft at an airport can interfere with taxi time and generate practical results remains little explored. This study aims to fill this gap.

4. METHODS

In this study, data collection and analysis were conducted regarding the taxi times of specific aircraft for takeoff (taxi-out) and after landing (taxi-in) at Guarulhos (SBGR), Congonhas (SBSP), Brasília (SBBR), Campinas (SBKP), Curitiba (SBCT), Porto Alegre (SBPA), Cuiabá (SBCY), Vitória (SBVT), Campo Grande (SBMS), and Salvador (SBSV) airports. The selection of these airports was motivated by their high airport movements in Brazil in 2022, with SBGR having 245,163 movements, SBSP with 197,184, SBBR with 135,626, SBKP with 128,564, SBSV with 76,365, SBPA with 66,140, SBCT with 56,058, SBCY with 44,975, SBVT with 40,128, and SBMS with 25,149 movements between landings and takeoffs. These airports have different taxiway and runway layouts, allowing for the analysis of the impact of runway configurations at different levels of interaction.

Data was collected from the dataset provided by the National Civil Aviation Agency (ANAC) on aircraft movements on the ground, both for domestic and international flights. By combining the data, it was possible to extract the demand at these airports. The data was restricted to the months of July, August, and December 2022, which recorded the highest number of commercial and general aircraft movements throughout the year. For the purposes of this study, the variation in taxi time was presented in Equation 1.

$$\Delta T\ 1 = |ATOT - AOBT| \quad (1)$$

being T1 the taxi-out time, the difference between the ATOT (Actual take-off time) and the AOBT (Actual off-block time), which is the difference between the departure time and the "off-block" time. According to Simaiakis and Balakrishnan (2009), the taxi-out time of an aircraft consists of three elements: unimpeded taxi time, waiting time in the departure queue, and delay caused by congestion resulting from interactions between the ramp and the taxiway.

$$\Delta T\ 2 = |AIBT - ALDT| \quad (2)$$

being T2 the taxi-in time, the difference between the AIBT (Actual in-block time) and the ALDT (Actual landing time), which is the difference between the "in-block" time and the landing time.

Based on the data analysis, data from general aviation were omitted in order to classify commercial aviation into aircraft of the

same size (Lieder et al., 2014, Ravizza et al., 2014) with similar sizes, shapes, weight, and parking positions.

Finally, a regression analysis was performed to test statistically significant differences among the perspectives presented by each airport in the months of July, August, and December (2022), which are the periods with the highest aircraft movements in 2022. The statistical modeling is presented by Equation 3.

$$Yi = \alpha + \beta iXi + ... + \beta pXp + \varepsilon i \quad (3)$$

where Y is the actual observation of the taxi-in or taxi-out time; α represents the intercept of the regression line (constant); βiXi + ... + βpXp refers to the independent variables of the model; and εi represents the random error associated with each observation.

5. RESULTS ANALYSIS

Upon closer examination of airport operations, it is evident that an aircraft in the process of taking off or landing can have an impact on the taxi time of another aircraft on the ground. The novelty of this study is to quantify how much a single aircraft affects the taxi time of another aircraft.

In the process of measuring the variation in taxi time due to aircraft movements at airports, the number of aircraft transitioning from the gate to the ends of the runway was taken into account, as well as the number of arriving (after landing) and departing (before takeoff) aircraft. This approach allowed for determining the variation in taxi-in and taxi-out times.

Taxi-out time

A separate regression was performed for each airport. Thus, it is possible to observe the constant (intercept) for each airport, which represents the estimated value of the dependent variable when all independent variables are equal to zero. It was found that Congonhas (SBSP), Brasília (SBBR), Campinas (SBKP), and Salvador (SBSV) airports experienced impacts on taxi-out time due to arriving and departing aircraft. On the other hand, Guarulhos (SBGR), Curitiba (SCCT), Porto Alegre (SBPA), and Vitória (SBVT) airports had their taxi time altered solely due to departing aircraft.

Table 1: Departures and arrivals for taxi-out

AIRPORT	PROCEDURE	ESTIMATE	STD ERROR
(Intercept)		11.98	0.16
SBBR	departure	0.35	0.01
	arrival	0.14	0.04
(Intercept)		6.96	2.01
SBSP	departure	1.09	0.03
	arrival	0.14	0.07
(Intercept)		6.08	0.62
SBSV	departure	0.93	0.03
	arrival	0.25	0.08
(Intercept)		8.64	0.66
SBCT	departure	0.93	0.07
(Intercept)		12.90	0.22
SBGR	departure	0.88	0.01
(Intercept)		5.46	0.36
SBPA	departure	1.10	0.05

Multiple R^2: 0.4686 Adjusted R^2: 0.4672

All p-value is < 0.05

Source: research data.

According to Table 1, for every departing aircraft from Brasília Airport (SBBR), the taxi time for an aircraft taxiing from the gate to the runway increased by 0.35 minutes. And for every arriving aircraft from the same airport, the taxi-out time for an aircraft increased by 0.14 minutes. The same trend can be observed for the other airports in Table 1.

The main objective of demonstrating the variation in taxi time from one airport to another is to test whether there is a consistent trend among airports or if taxi time varies

according to the configuration and layout of each airport, as pointed out by Ravizza (2013). The average taxi-out time for every departing aircraft is 3.6 minutes at Guarulhos Airport (SBGR) and 0.11 minutes at Vitória Airport (SBVT). While for every arriving aircraft, the average taxi-out time is 0.2 minutes at Campinas Airport (SBKP) and 0.08 minutes at Congonhas Airport (SBSP), as shown in Figure 2.

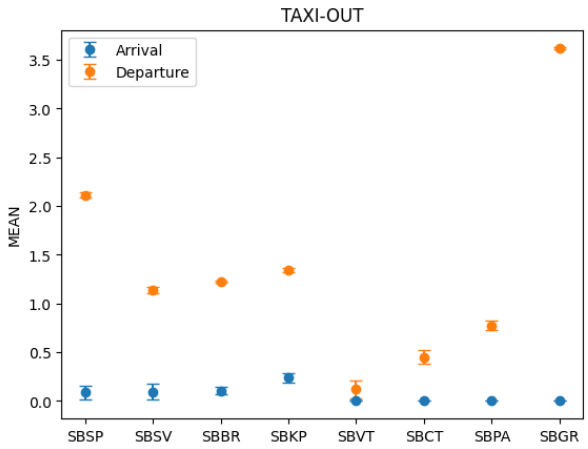


Figure 2: Average taxi-out results.
Source: the authors

When surface traffic operations occur near maximum capacity, congestion can arise both on taxiways and in holding areas. This situation leads to delays in aircraft movement, which in turn can increase taxi-out time (Diana, 2013; Simaiakis and Balakrishnan, 2009; Wang et al., 2021).

Taxi-in time

A separate regression was also performed for taxi-in for each airport, resulting in separate constants. From the analysis, it was noted that the airports of Brasília (SBBR), Guarulhos (SBGR), Campinas (SBKP), and Salvador (SBSV) experienced impacts on the time for both arriving and departing aircraft. On the other hand, the airports of Curitiba (SCCT), Cuiabá (SBCY), Porto Alegre (SBPA), and Congonhas (SBSP) had their taxi-in time altered only due to arriving aircraft.

Table 2: Departures and arrivals for taxi-in

AIRPORT	PROCEDURE	ESTIMATE	STD ERROR
(Intercept)		8.20	0.09
SBBR	departure	0.16	0.01
	arrival	0.12	0.02
(Intercept)		6.29	0.25
SBGR	departure	0.32	0.01
	arrival	0.36	0.02
(Intercept)		7.15	1.22
SBKP	departure	0.15	0.02
	arrival	0.28	0.03
(Intercept)		2.83	0.35
SBSV	departure	0.19	0.03
	arrival	0.11	0.04
(Intercept)		4.36	0.33
SBCT	arrival	0.21	0.07
(Intercept)		4.35	0.19
SBCY	arrival	0.23	0.13
(Intercept)		4.47	0.26
SBPA	arrival	0.48	0.07
(Intercept)		5.77	1.19
SBSP	arrival	0.57	0.03

Multiple R^2: 0.4182 Adjusted R^2: 0.4167
All p-value is < 0.05
Source: research data.

According to Table 2, for each aircraft departing from Brasília Airport (SBBR), there was an increase of 0.16 minutes for an aircraft taxiing from the gate to the runway threshold. And for each aircraft arriving from the same airport, there was an increase of 0.12 minutes for an aircraft performing taxi-out. The same trend can be observed for the other airports in Table 2.

As seen in Figure 3, the average taxi-in time is very low, with 0.86 minutes at Guarulhos Airport (SBGR) and 0.12 minutes at Salvador Airport (SBSV) for each departing aircraft. As for arriving aircraft, the average taxi-in time is almost irrelevant, with Guarulhos Airport (SBGR) having the highest average of 0.6 minutes.

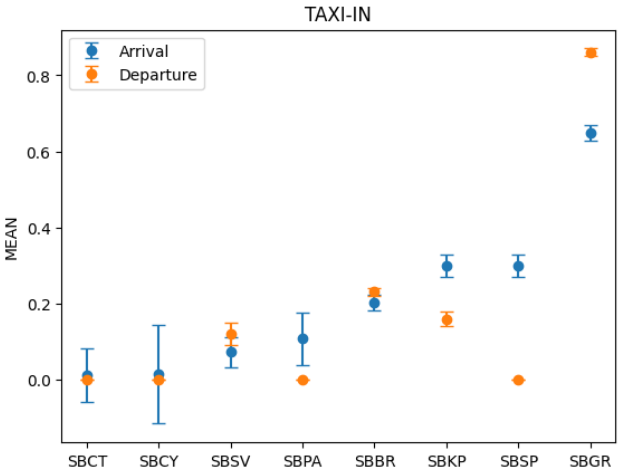


Figure 3: Average taxi-in results.
Source: the authors

The time required to travel each segment of the taxiways is constant. However, as indicated by Xu et al. (2020) and Diana (2013), the taxi-out time is greater than the taxi-in time, probably motivated by the increase in capacity caused by queuing aircraft about to take off, as arriving aircraft tend to quickly vacate the runway through REA and reach the gate (Zu et al., 2018; Lordan et al., 2016). Furthermore, aspects related to the runway layout contribute to the variation in taxi time (Wang et al., 2021b), as evidenced by our model when the largest airport in the model, Guarulhos Airport (SBGR), showed a higher variation in taxi time.

According to the analysis, taxi time is affected by the number of arriving and departing aircraft and the number of aircraft in transit on the movement area. This aircraft traffic and the runway configuration, due to travel distance, influence delays and runway congestion. As shown in Table 1 and Table 2, using only aircraft movements explains part of the variation in taxi time, with an R^2 value of 0.46 for taxi-out and 0.41 for taxi-in. In contrast, the R^2 presented in the model by Park and Kim (2023) indicated an R^2 of 0.27 for taxi-in and 0.70 for taxi-out. Similarly, in the model presented by Wang et al. (2021a), the R^2 ranges from 0.56 to 0.81 when introducing weather conditions as a determining factor for time variation.

The variation in taxi time shown in this study with 10 Brazilian airports enables better management of surface traffic. Therefore, the results of this research can be applied to improve the prediction of total taxi time for an airport, as well as assist planners and decision-makers in developing alternatives aimed at meeting demand, defining market strategies, and avoiding time and financial wastage resulting from operational bottlenecks at airports.

6. CONCLUSIONS

Taxi time directly affects the takeoff and landing sequence on the runway, which consequently impacts the operational efficiency of the airport. In this article, we aimed to analyze the variation in taxi time based on airport movements using a data-driven approach.

The inclusion of 10 Brazilian airports was beneficial for the purpose of comparisons and to understand how arrivals and departures of aircraft affect each airport. Certainly, there are opportunities for improving the accuracy of the models regarding the results and incorporating other factors that affect taxi time, such as weather conditions and subjective factors like airline standardization, which would provide insights to achieve this objective. Consequently, it would likely increase the explanatory power of the model as indicated by R^2. The model's explanatory capacity can also be enhanced by employing robust methods such as machine learning or other regression approaches.

7. REFERENCES

ANAC. (2023). Dados de Movimentação Aeroportuária. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/acesso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/operador-aeroportuario/dados-de-movimentacao-aeroportuaria>.

Cheng, S.; Zhang, Y.; Hao, S.; Liu, R.; Luo, X.; Luo, Q. (2019). Study of Flight Departure Delay and Causal Factor Using Spatial Analysis. *Journal of Advanced Transportation*, Article ID 3525912. https://doi.org/10.1155/2019/3525912

Diana, T. (2013). An application of survival and frailty analysis to the study of taxi-out time: A case of New York Kennedy Airport. *Journal of Air Transport Management*, v. 26, pp. 40-43. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.10.002.

ICAO (International Civil Aviation Organization) (2020). Airport Air Quality Guidance Manual, Doc 9889. International Civil Aviation Organization, Montréal.

Jiao, Q.Y.; Li, N.; Zheng, Z.; Feng, Z.; Qiang, Y.; Chen, X. (2022). Taxi Time Prediction by Using Data Driven Approach: A New Perspective. *SSRN*, 4084964. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4084964

Li, N.; Jiao Q-Y.; Zhang, L.; Wang, S-C. (2020). Using Deep Learning Method to Predict Taxi Time of Aircraft: A case of Hong Kong Airport. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, v. 52, No. 4, pp. 371 – 386. DOI: 10.6125/JoAAA.202012_52(4).03

Lordan, O.; Sallan, J. M.; Arroyo, M.V. (2016). Forecasting of taxi times: The case of Barcelona-El Prat airport. *Journal of Air Transport Management*, v. 56, Part B, pp. 118-122. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.015.

Murça, M.C.R. (2017). A robust optimization approach for airport departure metering under uncertain taxi-out time predictions. *Aerospace Science and Technology*, v. 68, pp. 269-277. https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.05.020.

Nikoleris, T.; Gupta, G.; Kistler, M. (2011). Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 16, Issue 4, pp. 302-308. https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.01.007.

Park, D. K.; Kim, J.K. (2023). Influential factors to aircraft taxi time in airport. Journal of Air Transport Management, v.106.

Postorino, M.N.; Mantecchini, L.; Paganelli, F. (2019). Improving taxi-out operations at city airports to reduce CO2 emissions. *Transport Policy*, v.80, pp. 167-176.

Ravizza, S.; Atkin, J.A.D.; Maathuis, M.H.; Burke, E.K. (2013). A combined statistical approach and ground movement model for improving taxi time estimations at airports. *Journal of the Operational Research Society*, v. 64, pp. 1347–1360.

Simaiakis, I.; Balakrishnan, H. (2009). Queuing Models of Airport Departure Processes for Emissions Reduction. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Chicago.

Wang, X.; Brownlee, A.E.I; Weiszer, M.; Woodward, J.R.; Mahfouf, M.; Chen, J. (2021b). A chance-constrained programming model for airport ground movement optimisation with taxi time uncertainties. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 132.

Wang, X; Brownlee, A.E.I; Woodward, J.R.; Weiszer, M.; Mahfouf, M.; Chen, J. (2021a). Aircraft taxi time prediction: Feature importance and their implications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 124. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102892.

Xu, H.; Kiao, K.; Cheng, J.; Yu, Y.; Qizhen, L.; Pan, J.; Chen, J.; Chen, F.;

Fu, Q. (2020). Characterizing aircraft engine fuel and emission parameters of taxi phase for Shanghai Hongqiao *International Airport with aircraft operational data. Science of the Total Environment*, v.720.

Zou, X.; Cheng, P; Liu, W.D.; Cheng, N.; Zhang J.P. (2018). A two-stage taxi scheduling strategy at airports with multiple independent runways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 95, pp. 165-184. https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.005.

.

IMPORTÂNCIA DO CONTROLE DE QUALIDADE EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO AEROPORTUÁRIAS

Livia Fortes Merighi, Matheus Silva Oliveira, Claudia Azevedo Pereira, José Antônio Schiavon
Instituto Tecnológico de Aeronautica (ITA)

*** Corresponding author e-mail address**: livia.merighi@gmail.com

PAPER ID: SIT 2215

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a importância da execução do Controle de Qualidade em obras de pavimentação nos aeroportos de forma a garantir o sucesso do empreendimento. Para pavimentos aeroportuários, a Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC), regula os parâmetros mínimos de atendimento de forma a garantir a segurança das operações através do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) números 153 e 154, assim como suas instruções suplementares respectivas. Neste sentido, a qualidade do projeto é de suma importância, sendo escorada em três pilares, escopo, custo e tempo. Este tipo de controle deve garantir o atendimento alicerçado aos pilares mencionados, assim como a segurança na execução e melhoria contínua do processo. Este estudo apresenta também recomendações de como esta atividade deve ser executada nas obras de pavimentação aeroportuárias, assim como aborda os sucessos e insucessos de quando não adotadas as boas práticas da engenharia. Desta maneira, este trabalho visa apresentar a importância do controle de qualidade antes, durante e após a execução, assim como avaliar como esta prática tem sido realizada no Brasil e exterior de maneira a garantir o atendimento aos parâmetros normativos e o sucesso da obra como um todo.

Palavras-chave: Controle de Qualidade, Controle Tecnológico, Obras de Pavimentação, Pavimento Aeroportuário. Ensaios.

1. INTRODUÇÃO

Como o Brasil apresenta dimensões continentais, pode-se afirmar que sua economia depende da infraestrutura de transporte para que as movimentações de cargas e passageiros se concretizem.

O segmento de infraestrutura de transporte, em especial o de obras de pavimentação, nos últimos anos têm ganhado atenção no país. Com crescimento superior ao INCC (Índice Nacional da Construção Civil) nos anos de 2021 e 2022 (FGV, 2023), o respectivo segmento tem como base o princípio da qualidade, composto pela tríade, escopo, custo e tempo.

Neste sentido, é válido afirmar que a qualidade do projeto tem sido um alicerce da durabilidade e do sucesso destas estruturas, na garantia do desempenho dos pavimentos, e na minimização das intervenções de manutenção de reabilitação dos mesmos (Oliveira *et al*, 2022).

Atualmente o modal rodoviário é o mais utilizado no país para movimentação de cargas e de passageiros (CNT 2022). Contudo, nem sempre é o mais adequado devido aos grandes deslocamentos necessários, falta de segurança e possível perda de insumos nas estradas, resultando em um custo operacional de frete muitas vezes elevado (Fagundes *et al*, 2018).

Assim, a busca pelo desenvolvimento e utilização de outros modais de transporte, no que tange aos deslocamentos de bens e passageiros, se torna cada vez mais requerido. Ao fazer esta análise, percebe-se a relevância do setor aéreo, porém, a qualidade dos aeródromos nem sempre está condizente com sua demanda e a necessidade de segurança das operações (Oliveira, *et al* 2020).

De acordo com o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos– CENIPA (2013), órgão brasileiro responsável pela segurança das operações aéreas, o número de ocorrências de saída de pista, assim incursão de fauna, bem como aves que entram em turbinas de aeronaves, *Foreing Object Damage* (FOD) e danos na infraestrutura das Pistas de Pouso e Decolagem (PPD) no Brasil, aumentaram consideravelmente após o ano de 2011.

Estas ocorrências podem ser atribuídas como consequências de diversos fatores, inclusive condições da pista e da infraestrutura aeroportuária, sendo difícil quantificar diretamente através da estatística a contribuição que a qualidade da pista de pouso e decolagem proporciona em termos de segurança (Oliveira, 2018).

Como uma das consequências, ao analisar as ocorrências de saída de pista nos aeródromos brasileiros que aumentaram em cerca de 18,2% desde o ano de 2015, observou se que tal feito se deve devido a perda da condição da infraestrutura e aumento da insegurança nas operações (CENIPA 2016).

Assim, percebe-se que a necessidade de se manter a segurança nas operações aeroportuárias é de extrema importância para que as PPDs possuam as condições adequadas de utilização.

Estes fatores, alertam sobre a importância de se executar um controle tecnológico e de qualidade adequado nas obras de pavimentação e assim assegurar o desempenho estrutural e funcional do pavimento (Oliveira *et al*, 2022).

É importante mencionar que se torna perceptível a avaliação da vida útil das estruturas de pavimentos em que foram realizados controle tecnológico dos materiais e de qualidade dos serviços, em comparação com a vida útil de estruturas de pavimentos em que não foram realizados controle e/ou fiscalização dos serviços de forma adequada durante sua construção ou execução.

Além do acompanhamento em campo, é notório a aplicação de outro mecanismo de garantia da qualidade, que está relacionado ao atendimento às diretrizes e prescrições mecanicistas fundamentadas nas normativas e manuais técnicos, sejam estes nacionais e internacionais, bem como à tecnologia.

Ademais, da contribuição da parcela empírica, somente possível através da qualificação técnica e do conhecimento prático dos agentes envolvidos, que somam no processo de sucesso para garantia e promoção da qualidade nas obras de pavimentação.

Tornando isso tangível ao notar as reduções dos números de aeródromos cujos índices de condição de pavimentos estejam classificados como ruins a críticos. Onde com o aumento considerável das infraestruturas sob administração privada, em função das concessões, tem-se tornado uma necessidade a exigência de parâmetros básicos das condições do pavimento das pistas de pouso e decolagem pelas agências reguladoras.

No caso do Brasil, a ANAC, exige periodicamente que os operadores de aeródromos enviem dados da infraestrutura dos aeródromos, com atendimento aos limites mínimos a nível de manutenção, parâmetros tais como atrito, irregularidade longitudinal, aderência pneu/ pavimento, ruído sinalização entre outros aspectos funcionais e estruturais, que complementam um sistema de gerência de pavimentos aeroportuários, minimizando os riscos e maximizando a segurança operacional.

Contudo, a segurança nas operações de pouso e decolagem em um aeródromo está atrelada a mais de um parâmetro operacional. Desta forma, controlando-se o fator infraestrutura pode-se obter um aumento na segurança operacional.

De modo que, para gerenciar estas questões, é necessário conhecer como se comportam os elementos desde a fase de concepção do projeto. Assim, buscou-se realizar uma análise de condições e características da mistura compactada de maneira a se ter uma previsão do desempenho da estrutura de pavimento.

Mediante todo o exposto, vale ressaltar que o sucesso de um empreendimento está atrelado com a junção de uma equipe técnica altamente qualificada, amparada por tecnologias que permitam realizar varreduras equipamentos modernos calibrados, assim como materiais atendendo às especificações de projeto e, a realização dos ensaios de controle por um laboratório com equipamentos com calibração rastreável e laboratoristas devidamente treinados, e pertencentes à Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE).

2. OBJETIVO

Este estudo teve como objetivo evidenciar a importância do controle qualidade na garantia do desempenho funcional em obras de pavimentação aeroportuária.

Ademais, este trabalho correlaciona as condições do controle tecnológico de materiais e de qualidade dos serviços, como um dos principais índices que conduzem à boa prática de execução de pavimentos e segurança das operações aeroportuárias.

3. METODOLOGIA

Por se tratar de um estudo de caso, a metodologia utilizada se baseou em revisão bibliográfica, seguida da coleta de dados, com posterior análise e validação do método, evidenciado no fluxograma da Figura 1.

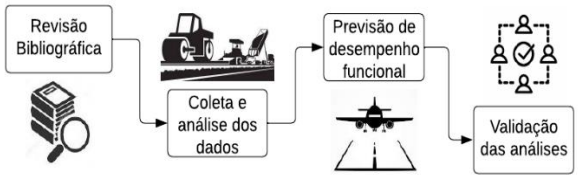


Figura 1: Fluxograma da metodologia.
Fonte: Autores (2023)

Conforme descrito na Figura 1, parte da metodologia é composta por uma coleta de dados, informações estas provenientes da obra de um aeródromo sobre jurisdição pública, ou seja, não concessionado, executada no presente ano de 2023. Cujos dados utilizados baseiam-se em informações sobre a densidade aparente, volume de vazios e grau de compactação da mistura asfáltica.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura compreendeu na consulta aos principais temas acerca da relação do controle de qualidade e tecnológico com o atendimento aos requisitos de desempenho funcional do pavimento.

4.1. CONTROLE TECNOLÓGICO E DE QUALIDADE

O controle da qualidade dos materiais e processos nas obras de pavimentação tem como objetivo a garantia da conformidade e atendimento às especificações de um empreendimento. Vale ressaltar que o controle da qualidade deve fornecer elementos que permitam a execução com segurança, melhoria contínua e redução de custos.

O controle tecnológico em contrapartida, tem como função assegurar a qualidade e garantir atendimento dos procedimentos e materiais empregados e, deve estar presente em todos os momentos na execução, inclusive antes do início

da obra, de forma a analisar e avaliar os materiais que serão empregados, durante a execução, ao término de maneira a atestar o cumprimento às especificações de projeto, para melhor garantir o atendimento da vida útil prevista no projeto.

Para realização do controle tecnológico é imprescindível que a sua execução ocorra com um time técnico altamente treinado, com conhecimento e capacidade técnica comprovada de forma a garantir a confiabilidade no processo.

Desta forma, orienta-se que a equipe técnica esteja devidamente treinada e presente durante toda execução, garantindo a utilização de equipamentos de laboratório com calibração rastreável.

Ainda como um controle tecnológico efetivo, deve ser considerada a retroalimentação dos processos em busca da melhoria contínua, considerando produtividade e prevenção de patologias precoces que podem ser causadas devido à perda da qualidade seja dos materiais, assim como da execução.

De maneira a garantir a qualidade dos materiais e atendimento aos parâmetros de projeto e execução, devem ser realizados ensaios conforme as normativas vigentes e seus resultados analisados com cautela.

Ainda, deve ser bem definido o papel da construtora, assim como o do proprietário. A construtora deve ter enfoque no processo, em que além do atendimento aos parâmetros exigidos, contribuam com a melhoria contínua do processo e execução, sempre em prol da busca de redução de custos, enquanto o proprietário deve garantir a qualidade no recebimento, ou seja, deve verificar a conformidade do processo e atender os parâmetros de confiabilidade do controle, de forma a garantir a melhoria contínua e aprimoramento da execução.

Vale ressaltar que no Código de Defesa do Consumidor no Brasil atribui corresponsabilidade a todos os intervenientes de uma obra, do construtor ao proprietário, onde se justifica a importância de um controle de qualidade adequado de maneira a garantir segurança e sucesso ao empreendimento (Fortes *et al.*, 2012).

O manual da ANAC de obras e serviços de Manutenção (2020) explica a importância, em obras de pavimentos aeroportuários, na adoção de metodologias construtivas e controle de qualidade que assegurem a conformidade dos parâmetros exigidos no regulamento para as obras de pavimentação aeroportuária.

ANAC (2023), especifica no documento "Regulamento Brasileiro da Aviação Civil" (RBAC) número 153, os aspectos mínimos funcionais para atendimento à manutenção de pavimentos, onde devem ser considerados parâmetros funcionais tais como Irregularidade Longitudinal, através do *International Roughness Index* (IRI), índice de Serventia (*Pavement Condition Index* – PCI), macrotextura e coeficiente de atrito.

Com relação aos parâmetros de projeto para novas construções, deve-se atentar a normativa prevista através do documento RBAC 154 (ANAC, 2021), tais como declividade longitudinal, transversal, assim como parâmetros de projeto do tipo comprimento, largura, entre outros.

A *Federal Aviation Administration* (FAA), recomenda através do documento AC 150/5370-10 (FAA, 2018) que obras com valores superiores a U$ 500.000,00 (dólares) possuam controle de qualidade que garanta o atendimento às especificações dos materiais, da produção dentro dos limites aceitáveis normativos e de projeto.

Neste sentido, este documento ainda explica que Qualidade é uma mescla da verificação do atendimento dos materiais às especificações, realização dos ensaios definidos no projeto e normas vigentes, da utilização de mão de obra qualificada, equipamentos devidamente calibrados, inspeção e documentação de projeto, sendo essencial a garantia dos seguintes aspectos (FAA, 2018):

- Equipe técnica qualificada;
- Garantia da qualidade dos materiais;
- Atendimento as especificações de projeto e normativas vigentes, assim como
- Documentação do controle de qualidade.

A FAA (2018) ainda orienta que o acompanhamento deve ocorrer desde a homologação de usinas e materiais, de forma a garantir a execução conforme projeto, assim como acompanhamento durante a execução com

equipamentos devidamente calibrados com reportes diários.

Fortes *et al* (2005) explica que o Controle de Qualidade ainda deve englobar ações necessárias quando identificado necessidade de ajuste de produção de forma a garantir a confiabilidade e um resultado satisfatório.

4.2 IMPACTOS DO VOLUME DE VAZIOS NA MISTURA ASFALTICA

O Volume de Vazios (VV) apresenta um papel fundamental dentro do processo do concreto asfáltico, permitindo uma compactação adicional e fluidez. A existência deste parâmetro em excesso pode causar dano por fadiga devido às cargas repetidas impactando na resistência da mistura e causando trincamento precoce. Vale ressaltar, que o volume de vazios pode ser classificado de acordo com a sua porosidade, sendo uma mistura aberta ou fechada (Zaltuom, 2018).

Desta forma, este parâmetro possui um impacto direto no desempenho da mistura asfáltica, assim como resistência em termos de temperatura, desempenho a fadiga e deformação permanente. Uma mistura contemplando um VV superior ao de projeto será menos enrijecida e possuirá um modulo menor quando comparado com uma mistura com menor volume de vazios, desta forma, sendo suscetível a deformação permanente (Shu *et al*, 2023; Roy, Veeraragavan, Krishnan, 2013).

A compactação da mistura asfáltica é o processo que o ligante asfáltico assim como agregados são comprimidos em um volume reduzido. A redução do volume de vazios pode também ocorrer com o tempo através da densificação e passagem de tráfego, ficando com maior resistência a deformação permanente e envelhecimento do ligante. (Zaltuom, 2018).

A estabilidade pode ser traduzida como resistência a deformação do concreto asfáltico na exposição ao tráfego, podendo aumentar ou reduzir em função do volume de vazios, onde a estabilidade geralmente aumenta quando o volume de vazios é reduzido (Zaltuom, 2018).

A durabilidade do concreto asfáltico está atrelada com o emprego Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) adequado ao projeto, o qual está diretamente relacionado com o volume de vazios existente. Entretanto, quando o volume de vazios é inferior a 2%, o ligante asfáltico quase preenche os vazios da massa, deixando a mesma mais "fluída", sendo então menos resistente a deformação permanente quando exposto ao tráfego pesado.

Misturas que não atingem o grau de compactação de projeto também possuem uma menor resistência a deformação permanente devido a resultar em uma estrutura menos resistente sob a ação do tráfego (Zaltuom, 2018).

A Figura 3 a seguir apresenta esta definição:

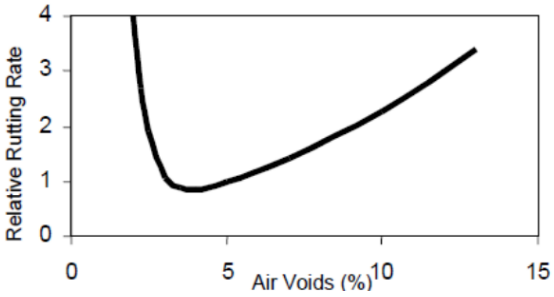


Figura 3: Trilha de roda/ deformação permanente *versus* Volume de Vazios
Fonte: Zaltuom (2018)

A Figura acima apresenta o volume de vazios *versus* a taxa de deformação em trilha de roda

Com relação a vida de fadiga, o volume de vazios também impacta, onde maior volume de vazios pode ocasionar em uma menor vida de fadiga. (Zaltuom, 2018).

A vida de fadiga está atrelada a passagem da carga e resistência ao trincamento, onde volumes de vazios da ordem de 5% a 8% pode resultar em até 50% de perda na vida de fadiga. (Zaltuom, 2018)

A Figura 4 apresenta o estudo da vida de fadiga x o volume de vazios.

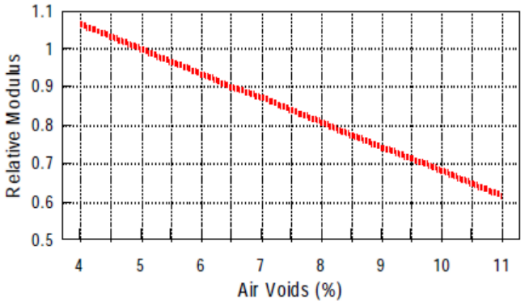


Figure 2: *Relative Fatigue Life vs Air Voids*

Figura 4: Vida de fadiga x o volume de vazios.
Fonte: Zaltuom (2018)

Com relação a resistência ou enrijecimento da mistura asfáltica, Zaltuom em 2018 concluiu que acima de 5% até 8% no VV, foi observada uma redução de cerca de 20% na resistência do concreto asfáltico (Figura 5).

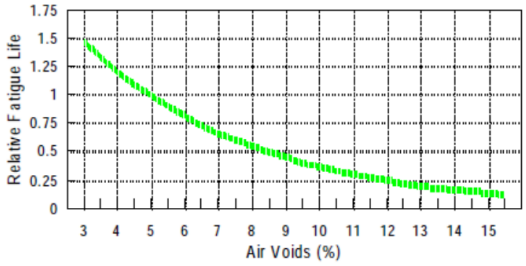


Figure 3: *Relative Strength vs. Air Voids*

Figura 5: Volume de Vazios x Vida de Fadiga
Fonte: Zaltuom (2018)

A mistura do concreto asfáltico pode ser classificada como porosa quando apresenta uma graduação aberta e baixo volume de finos de forma a permitir que a camada tenha volume de vazios interconectados. O volume de vazios interconectados tem como função permitir o escoamento da água no pavimento. Entretanto, quando há um volume de vazios significativo, este pode causar o envelhecimento e desagregação, interferindo na vida de fadiga (Zaltuom, 2018).

Misturas graduadas densas não devem exceder 8% e tampouco apresentar o VV inferior a 3% durante sua vida útil, onde o alto volume de vazios (acima de 8 por cento) ou inferior a 3% pode causar patologias no pavimento (Zaltuom, 2018).

Desta forma, um elevado volume e vazios gera uma maior fluidez na mistura e a maior parte das falhas está atrelada com a compactação inadequada da mistura, tendo impacto na vida de fadiga, assim como na geração de deformação permanente do pavimento.

5. RESUTADOS

5.1 O AERÓDROMO

Tratando-se de um estudo de caso, os dados coletados para análise, foram provenientes de um aeródromo de médio porte público (não concessionado), da região sudeste do Brasil.

Aeródromo este cujo código de classificação da infraestrutura segundo regulamento da ANAC (RBAC 154) está classificado como sendo 4E, estando este com denominação operacional setorizada, ou seja, setor leste e oeste, sendo que para a devida análise foi considerado apenas o setor W, conforme Figura 6.

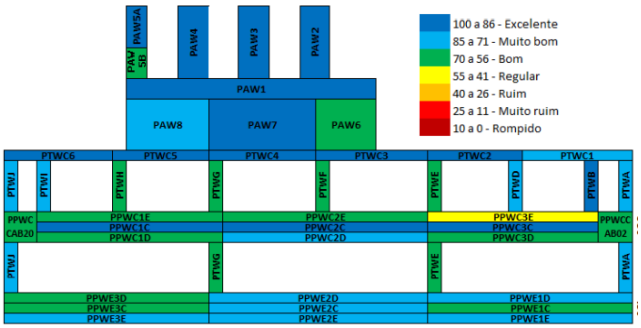


Figura 6: Esquematização do aeródromo com o PCI das referidas pistas.
Fonte: Dagher *et al* (2021)

De acordo com esquematização demonstrada na Figura 6, o setor W possui duas pistas de pouso e decolagem. Neste tocante foram coletadas informações a respeito das misturas asfálticas utilizadas no recapeamento da PPD.

5.2 MISTURA - DENSIDADE APARENTE, VOLUME DE VAZIOS E GRAU DE COMPACTAÇÃO.

O procedimento de dosagem de uma mistura asfáltica seja qual for o tipo da mistura em questão, inicia se com a escolha dos materiais componentes e por meio de procedimentos experimentais, para definição de um teor "ótimo" de ligante, a partir da faixa granulométrica definida no projeto da mistura.

Sendo que o teor ótimo é definido conforme teor de projeto e varia conforme o critério utilizado na sua avaliação, e em detrimento às normativas do setor. Fato que o teor de projeto tem relação direta com a energia de compactação (laboratorial e em campo), tipo de mistura, bem como condições climáticas a qual o pavimento estará submetido.

Para isso torna se necessário conhecer as densidades dos materiais componentes das misturas, para posteriormente determinar a densidade da mistura compactada. Ressalva que a densidade da mistura compactada em laboratório difere da densidade aparente em

campo, decorrente de metodologias distintas de mensuração, métodos de compactação diferentes e de outras condições de contorno

Conforme a DNIT 428/2022 - ME, a Determinação massa específica aparente (Gmb) de corpos de prova compactados (NBR – 15573:2012), é obtida por razões de estado da mistura que são alterados conforme o grau compactação em campo, a temperatura de compactação da mistura, e o volume de vazios.

Na presente análise foram consideradas as densidades mensuradas em campo e laboratório em função do traço da mistura. Tendo sido determinado a densidade máxima teórica (DMT) pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica o equivalente a 2536 kg/m^3, além da determinação em laboratório da densidade máxima medida (Gmb) correspondente a 2221 kg/m^3.

Quanto aos cálculos da densidade aparente da mistura compactada obtida em campo, foi tomado para amostra um total de 326 espécimes para determinação da Gmb, conforme ilustrado na Figura 7.

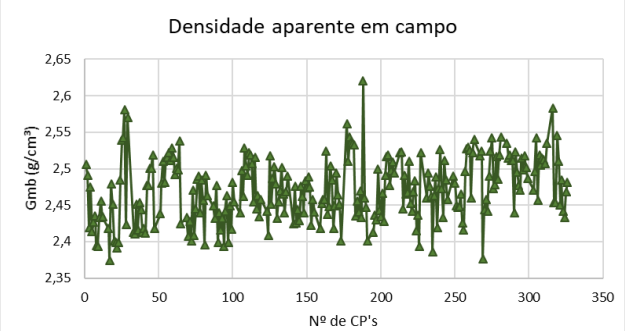


Figura 7: Valores de densidade aparente da mistura compactada.
Fonte: Autores (2023)

É possível observar que os valores da densidade aparente da mistura compactada variaram entre 2350 kg/m^3 a 2650 kg/m^3. Tal variação pode ser explicada pela não homogeneidade durante o processo de compactação das misturas o que ocasiona em uma certa variação da massa específica aparente, conforme Figura 8.

A dificuldade de homogeneidade durante o processo de compactação, pode estar relacionado as interveniências que ocorrem no campo (obra) durante a passagem dos rolos, uma vez que conforme maior é o gradiente térmico usado na compactação, é observado também uma maior dificuldade em atingir o grau de compactação (GC) especificado em manuais.

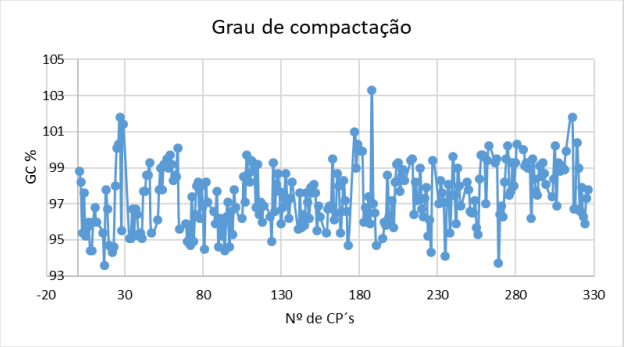


Figura 8: Valores do grau de compactação da mistura e campo.
Fonte: Autores (2023)

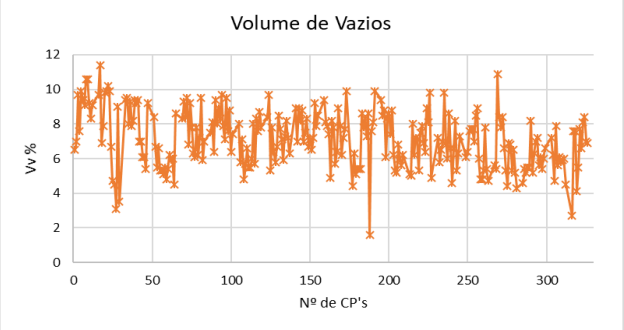


Figura 9: Valores do volume de vazios da mistura e campo.
Fonte: Autores (2023)

Conforme ilustrado nas Figuras 8 e 9, é visível que a mistura em campo não atingiu o grau de compactação especificado nos manuais para fins de pavimentação aeroportuária. Dentre os espécimes analisados o grau de compactação das amostras variou de 94% a 103% (análise unitária), e para as análises médias houve valores superiores a 97%. Estando o GC de uma forma geral apresentando valores fora dos limites especificados pela DIRENG e pelo DNIT.

O que é comprovado pela relação, e variação do número de vazios da mistura (VV), apresentado na Figura 9. Onde de acordo com o projeto de mistura o VV era de 5,2%, e em campo este variou de 3% chegando a valores superiores a 11%.

De acordo com a normativa DNIT 112/2009-ES, a norma estabelece que o controle do grau de compactação-GC da mistura asfáltica deve ser feito medindo-se a densidade aparente de corpos-de-prova extraídos da mistura espalhada e compactada na pista, por meio de brocas rotativas, e comparando-se os valores

obtidos com os resultados da densidade aparente de projeto da mistura.

Devendo ser realizadas determinações, em locais escolhidos aleatoriamente, durante a jornada de trabalho, não sendo permitidos GC inferiores a 97% ou superiores a 101%, em relação à massa específica aparente do projeto da mistura.

Já de acordo com a especificação da DIRENG 04.05.610 - Densidade das misturas compactadas e das juntas, o critério para aceitação das características de densidade, para cada lote de mistura compactada é baseado no método da Percentagem Dentro dos Limites – PDL (DIRENG-MC 01), tendo como limites de tolerância, a densidade da mistura em 96,3% e a densidade da mistura nas juntas em 93,3%.

Por se tratar de uma obra aeroportuária, foi adotado os limites preconizados pela DIRENG, e por se tratar de um número considerado de amostras, foi realizado uma análise estatística para determinar quais eram as percentagens que se enquadravam dentro dos limites mínimos e máximos.

Logo foi utilizado para determinação o método da Percentagem Dentro dos Limites DIRENG-MC 01, cujos cálculos culminaram para um valor de PDL de 71,6%. Percentual este inferior ao especificado pelo órgão para o setor aeroportuário, que seria de no mínimo 85%.

6. CONCLUSÕES

O Controle Tecnológico e de Qualidade possui um papel importante para garantir atendimento aos procedimentos vigentes e materiais empregados.

Conforme mencionado anteriormente, para realização do controle tecnológico é imprescindível assegurar um time técnico altamente treinado, com conhecimento e capacidade técnica comprovada de forma a ter confiabilidade no processo.

Ademais, é importante que o controle tecnológico e de qualidade seja realizado independentemente pela gerenciadora e pela empreiteira, sendo que os ensaios devem ser realizados por laboratórios pertencentes à RBLE, e que os resultados obtidos sejam comparados e analisados criteriosamente.

Neste trabalho foi abordada a importância do controle tecnológico e de qualidade voltado para os parâmetros de volume de vazios e grau de compactação que podem inferir no desempenho e vida útil da mistura asfáltica.

Vale ressaltar que ademais a estes parâmetros descritos no estudo, deve-se garantir o atendimento as resistências de projeto, assim como demais ensaios utilizados para garantia da qualidade do CBUQ.

Portanto, o Controle Tecnológico e de Qualidade realizado de maneira adequada auxilia no atendimento aos parâmetros vigentes e consequentemente para assegurar vida útil do pavimento.

REFERÊNCIAS

ANAC (2020). *Manual de Obras e Serviços de Manutenção*. Brasília. Agência Nacional da Aviação Civil, 61p.

ANAC (2021). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil- Resolução nº154: Projeto de Aeródromos*. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil, 238p.

ANAC (2023). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil- Resolução nº153: Aeródromos- Operação, Manutenção e Resposta à Emergência*. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil, 107p.

CENIPA - Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. 2013. Aeródromo - Sumário Estatístico. Brasília, Brasil.

CENIPA – Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeroportuários- Dados de acidentes e saídas de pistas de aeródromos nos anos de 2013 a 2015. SÃO PAULO, 2016.

DIRENG 04.05.610. Concreto Betuminoso Usinado a Quente.- Especificações Gerais para Obras de Infraestrutura Aeroportuária 2002.

DIRENG MC-01. Método para Estimar a percentagem de material dentro dos limites da especificação.- Métodos de Controle para Obras de Infraestrutura Aeroportuária 2002.

DNIT 112/2009-ES- Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico com asfalto borracha - Especificação de serviço. 2009

FAA (2018). *AC No:150/5370-10: Advisory Circular- Standard Specifications for Construction of Airports*. Washington D.C: Federal Aviation Administration.

Fortes, R. *et al* (2005). *A importância do controle tecnológico e de qualidade na reabilitação de pavimentos após a intervenção de Concessionárias em São Paulo.* Curitiba: 36ª Reunião Anual de Pavimentação- 36ª RAPv, 2005.

Fortes, R. M.; Merighi, João Virgilio; Barbosa Jr., A.S.; BENTO; B.B. A importância do Controle Tecnológico e de Qualidade efetivos, realizados por laboratórios acreditados pelo INMETRO, de maneira a assegurar o sucesso da obra (*The importance of the effective Technology and Quality Control, performed by laboratories accredited by INMETRO in order to ensure the success of the construction works*). ANAIS DO 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2012 – 54CBC. ISSN 2175-8182. IBRACON, outubro/2012. Maceió, AL.

INCC-M Resultados 2023. Disponível em: https://portal.fgv.br/noticias/incc-m-resultados-2023. Acesso em :07 set 2023.

Neethu Roy, A. Veeraragavan, J. Murali Krishnan. Influence of Air Voids of Hot Mix Asphalt on Rutting within the Framework of Mechanistic-empirical Pavement Design, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 104, 2013, Pages 99-108, ISSN 1877 0428,https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.102.

Oliveira, M.S., Farias, M. M., Silva, J.P.S., "Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation", Case Studies in Construction Materials, v. 16, e01132, 2022. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01132.

Oliveira, M. S.; Farias, M. Hot recycled asphalt mixtures with the incorporation of milled material: analysis of the mechanical performance and economic presumption in the applicability of the technique. Matéria (Rio de Janeiro), v. 27, 2022.https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0217

Oliveira, M. Silva; Pereira, Azevedo, C.; de Assis Farias, Pollyany Cristie. *Applicability of PAVEAIR for Airport Pavement Management: Comparison between Military and Civilian Runways. Journal of Civil Engineering and Architecture*, v. 14, n. 7, p. 360-367, 2020.

Pesquisa CNT de Rodovias 2022- PRINCIPAIS DADOS : Disponível em: https://cms_pesquisarodovias.cnt.org.br//PDFs/Resumo_Principais_Dados_Pesquisa_

CNT_2022_FINAL.pdf. ACESSO EM: 26/08/2023.

Shu, L.-H.; Ni, F.-J.; Jiang, J.-W.; Zhao, Z.-L.; GUO, Z.-Y. Calculation and Characterization of Air Void in Mortar of the Hot Mix Asphalt (HMA) Based on CT Scanning and Image Analysis Methods. Appl. Sci. 2023, 13, 652. https://doi.org/10.3390/ app13010652.

. Torres, O., Fagundes, M.B.B., Figueiredo, A.M.R., et al, “Impacto da Implantação do custo do pedágio na BR-163 em relação ao transporte de soja do estado de Mato Grosso”, Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 55, n. 3, pp. 1, 2017. doi: http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550307

Zaltuom, Ali. (2018). A Review Study of The Effect of Air Voids on Asphalt Pavement Life. 618-625. 10.21467/proceedings.4.29.

Indonesian Airport Design and Customer Satisfaction

Tika Andyani Putri
Coventry University, Environment Engineering and Computing, Air Transport Management

*** Corresponding author e-mail address:** putrit@coventry.ac.uk

PAPER ID: SIT2243

ABSTRACT

Customer guidance (wayfinding) is a significant design and layout consideration for airport facility design. Individuals may frequently need help identifying their destinations with various navigational tools. The visibility indicator is often used to assess the comfort of navigation. However, there has not been much academic research on the impact of airport design regarding wayfinding and what kind of wayfinding variables can impact customer satisfaction in Indonesian airports. Consequently, this study evaluates the impact of wayfinding design in Indonesian airports and investigates what variables can influence customer satisfaction. The study uses a quantitative methodology, an online survey. In this case, the author conducts primary data from an online survey through JICS software. In addition, three variables will be investigated, corridor signage, airport maps and verbal directions. Therefore, this study revealed that people tend to care about wayfinding aids. They agree that clear wayfinding is vital since it will help them identify the location and guide them to their destination. This will lead them to save time, reduce the anxiety of stress, and be secure in airport orientation. Furthermore, the effectiveness of precise wayfinding tools will not disorient the passenger experience so that they may miss their flights. Therefore, this could lead to optimising customer movement, reducing congestion, and enhancing overall airport operations. As a result, people will have an optimal journey because of clear wayfinding. This will enhance the customerâs experience, which is related to the level of customer satisfaction at the airport. Some variables influence customer satisfaction with Indonesian airports regarding wayfinding orientation, the corridor signage, airport maps and verbal direction. The study also demonstrated that people prefer corridor signage to help them find directions in the airport, while the airport map is the last option. Moreover, this study proved that every variable of wayfinding is correlated with each other.

Keywords: Airport Design, Wayfinding, Customer Satisfaction

1. INTRODUCTION

Under current conditions, large-scale complexity, and significant unpredictability on both supply and demand sides, transportation designers are relied on to handle the current and prepare for foreseeable transportation systems. This is particularly so in the aviation industry, where substantial technical developments and shifts in travel behaviour push airlines, airports, and other participants to alter their company strategies constantly (Kalakou et al., 2015). According to the international air travel component, substantial challenges must be addressed in this context: sluggish adoption of global regulations, differing development levels, and unique cultural practices.

However, it appears that more than a century after the advent of today's aviation, technology is entering air transport faster than ever before, necessitating an urgent reassessment of airport design. Airports have growing ambitions to create a dramatically different business context. New operational and management ideas are being implemented to create a speedier, more straightforward, safer, and more compelling journey (Kalakou et al., 2015). The airport services sector aims to serve travellers as customers and build the terminal's atmosphere to provide a feeling of an area.

Multiple environment stimuli categories have been developed, such as discovering three environmental stimuli (atmosphere, layout, and social variables) that significantly impacted customers' views of the reputation of a service provider (Bogicevic et al., 2016). Considering the service environment, servicescapes are lean or elaborate (Bitner, 1992). Even though various research has characterised airports as elaborate servicescapes, servicescape characteristics usually have been evaluated by employing quality of service and customer satisfaction surveys (Chang and Chen, 2012; Chen and Chang, 2005; Correia et al., 2008; De Barros et al., 2007).

Customer impressions regarding service interactions are critical to all business organisations' performance (Kelley & Turley, 2001). How people comprehend each service's qualities immediately affects how they react when prompted to provide an overall opinion about the level of customer service supplied. Terminal structures, like any other service provider, are not immune. Customer expansion has compelled the operators of airports to embrace more customer-focused management procedures (Yeh & Kuo, 2003). Airport managers must recognise and comprehend their visitor’s wants and expectations to provide greater satisfaction (Atalik, 2009).

Customer happiness is an important success metric for airport operations. The manner in which operators of airports decide to offer a wide range of airport services may have a significant impact not merely on their financial achievement but additionally on their connection with terminal customers (Graham, 2003). Terminal performance is measured differently depending on the setting (Yeh & Kuo, 2003) and the various viewpoints of passengers (airlines, concessionaires, etc.) on what constitutes excellent or appropriate service (Lemer, 1992).

Orientation or navigation for airport customers in an airport terminal facility is a key topic in this field of research, according to

Fewing. R (2001), wayfinding is the method of figuring out a route in the geography or constructed surroundings; that is, identifying one's current position and understanding the way to travel to the desired location. In addition, Modak & Patkar (1984) mention that while analysing the customer service quality given at a terminal, the suitability of placement and simplicity of recognising terminal amenities take precedence over the number of amenities accessible and the effectiveness of the operation.

A survey also found that the existence of navigational aids substantially impacts defining an airport's service quality (Rhoades et al., 2000). This is an excellent guidance system that may assist in reducing moving time within the terminal building at the airport and decrease ambiguity while navigating (Caves and Pickard, 2001), thus improving air passenger fulfilment with the airport. Airport terminals support many various consumers and operations.

They handle customer and luggage check-in, transport people and luggage to planes, move people between flights, manage flight movements, and offer area for businesses that help fund the airport's operations. This multidimensional operation necessitates that they run efficiently to benefit every stakeholder: customers, airline companies, airport owners, and airport service providers such as security and border control agencies. Nevertheless, existing practice across numerous airports worldwide reveals that airport service drops short of stakeholders' expectations (Kalakou et al., 2015).

According to World Bank (2022), Indonesia's population reached 273 million, with more than 17.000 islands. The territory of Indonesia consists of sea and islands. The sea area of Indonesia is around 5.9 million km^2 (Pradhani. S. I, 2017). Indonesia is aware that air transportation is vital since Indonesia is an archipelago state.

Therefore, air transportation is convenient, making it much easier for people to connect in Indonesia. Currently, Indonesia has 683 airports, with 34 commercial airports managed by Angkasa Pura 1 and Angkasa Pura 2. Angkasa Pura 1 manages the airport in Eastern Indonesia, while Angkasa Pura 2 manages the airport in Western Indonesia.

In addition, there has not been much research on the impact on customer satisfaction in airport design in Indonesia. Therefore, this study investigates the influence of the airport's design (the signage) on customer satisfaction in Indonesian airports to assist the airport sector in comprehending the terminal's environment from the traveller's point of view. The literature continuously emphasises the crucial role of navigation and gives it significant weight in determining airport terminals' overall level of service (LOS).

Airports Council International (2000) and Correia et al. (2008) surveys both indicated that signage (or direction) is a critical factor for assessing the general excellence of the airport. Wayfinding scored third in relevance among the ten LOS factors included in the regression analysis by Correia et al. (2008). Furthermore, this research will use quantitative methodology with online surveys as the tool.

Table.1 Ten Busiest Airports in Indonesia

No	Airport Name	Airport Code	Location	Passenger Movement
1	Soekarno–Hatta International Airport	CGK	Tangerang	54,496,625
2	Ngurah Rai International Airport	DPS	Bali	23,779,178
3	Juanda International Airport	SUB	Surabaya	21,882,335
4	Sultan Hasanuddin International Airport	UPG	Makassar	13,537,770
5	Kualanamu International Airport	KNO	Medan	12,245,116
6	Adisutjipto International Airport	JOG	Yogyakarta	8,634,369
7	Halim Perdanakusuma International Airport	HLP	Jakarta	7,400,000
8	Hang Nadim International Airport	BTH	Batam	6,500,000
9	Sultan Mahmud Badaruddin II International Airport	PLM	Palembang	5,126,298
10	Jenderal Ahmad Yani International Airport	SRG	Semarang	5,038,603

Source: Direktorat Jenderal Perhubungan Udara, 2023

2. BODY OF ARTICLE

2.1 LITERATUR REVIEW

a. Corridor Signage

According to Fewing. R (2001), to convey details to the visitors of a structure, highway system, or town, signage offers a type of single-way interaction. Guidelines or identifying will often be provided as a specific type of information. The sign should state the obvious. Signage must convey information without confusion and at the appropriate time and location. Signs must additionally direct, inform, control, and identify, and there needs to be a distinction between directional, identification, and reassuring signs (Fewings. R, 2001).

Some airports have employed signs to project an image of business while also guiding travellers in the right way. BAA (Heathrow, Gatwick, etc.) favours black typography on a yellow backdrop, whereas Manchester uses pink letters on a mauve background. The scheme of colours is arguably less significant than the quality and quantity of signage (save for individuals who are colour-blind) as long as the wording is legible. The direction and location signs take priority over retailing and promotion.

According to (Andre, 1298) directional information has to be positioned such that it may be quickly and clearly connected to the route decision that the consumer has to make. As a result, planners need to be cognizant of where signs are positioned as well as where they may be viewed from. In addition, a directional sign's information must be presented in a way that makes sense to the consumer and is helpful to them.

Planners must ensure that only the necessary information is presented and combinations of displays are avoided. Display combinations risk causing display components to interact in ways the system designer did not anticipate. As an illustration, Kantowitz et al. (1990) discovered the display in Figure 3.2. Understandably, a traveller could be perplexed about the proper correlation between gate number and navigational arrows. By adding a suitable line (vertical or horizontal, depending on whether gates 1 to 5 are to the left or the right) between the display components in this example, the problem is simply resolved (Kantowitz et al., 1990).

Due to the inherent constraints of human short-term memory, some information redundancy is required. This might be in the form of a visual image or symbol that supplements a textual explanation or confirmation indicators that inform the traveller that they select a proper option (Andre, 1298).

b. Airport Map

Airport maps are prominently displayed schematic or graphical representations of the terminal and may be portable or immovable. Stationary maps are positioned in spacious display cabinets so customers and tourists can readily study them. They frequently take the form of the *you-are-here* design. These maps can be found in most airline magazines or at the airport's customer service and information counters (Andre, 1298).

In addition, to make it easier for them to find themselves on the map, the map should be put in an asymmetrical position, ideally near an iconic structure. An upward-pointing *you-are-here* sign may represent the person standing in front of the map, and the map position could be symbolically shown as correctly aligned with the environment by a horizontal line at its appropriate place on the map (Andre, 1298).

Furthermore, amenities and services (such as restaurants, toilets, informational stands, etc.) on the map should be represented either visually or with an icon. Textual explanations would be ambiguous and more challenging for international travellers to comprehend (Andre, 1298). Moreover, Andre (1298) also stated that planners should avoid using colour in a manner that goes against common assumptions or connotations that specific hues are known to convey (such as red for emergencies/help; blue).

c. Wayfinding Issue

Some visitors to vast and complex structures have difficulties finding their way around. The causes are thought to be nurturing. These involve well-designed and well-located signage and maps. Some people have problems with attention, memory, and comprehension (Dewar, 1992), inexperience with comparable situations (Appleyard, 1970), and the intricacy of the structure's plan (Best, 1970 & Weisman, 1981).

In addition, Chennayeff (1968) stated that while writing on orientation and transportation systems, noted that the issue (orientation) is also one of the unclear or absent details on which all other operations rely. With unclear and prompt information, an airline customer who might simply switch to their automobile or rapid transit stays stumped and frustrated. In fact, there is a clarity gap, which is produced by much more than wrong signals.

Moreover, corridor guiding signs are typically in the shape of direct lines. However, one issue with these signs is that they attempt to depict three-dimensional details on a two-dimensional or flat surface. This frequently leads to uncertainty as to whether a sign is pointing up or straight ahead, confusing the traveller about the terminal design ahead (Andre, 1298).

d. The Impact of Wayfinding

Time spent at an airport for passengers is becoming a growing part of the traveller's total journey. However, due to the complicated design and faulty guidance-information services found in many airport passenger terminals, this time is often spent in a state of anxiety, uncertainty, and

disorientation (Carpman et al., 1985). As a result, terminal planners and designers must attempt to provide a comprehensive guide system, comprising architecture, signage, maps, and people, that supports rather than hinders the passengers' orientation process.

These aspect needs to be considered since this also links to the customer satisfaction level of an airport. Furthermore, the system's design should guarantee that all these components reinforce one another (Carpman et al., 1985). Many people find it challenging to navigate a new environment. Enhancing the appearance of the navigation system by putting the *you-are-here* icon in locations that are consistent with one's forward vision will considerably enhance the navigating skills of people inexperienced with the airport terminal.

Any attempt to improve the standard of wayfinding structures in customer terminal structures must be founded on an awareness of the essential variables that underpin customer efficiency and happiness. Since a few of these customers missed their flights, the data show that information booths and the verbal navigation instructions they give are crucial navigational help for many customers (Andre, 1298). It may alternatively show that passengers do not spend time studying maps and signage and instead prefer to ask for verbal trip instructions. In any instance, one may claim that a more effective visible guiding system would help customers who depend on maps and signage and reduce the need for travellers to visit information desks (Andre, 1298).

2.2 METHODOLOGY

This project also intends to collect data from individuals using a questionnaire. This contributes a quantitative component to the investigation, the results of which will be compared and utilised to support inductive assumptions. The quantitative questionnaire approach is the primary investigation method for this research on the influence of wayfinding design in Indonesian airports.

2.3 RESULT

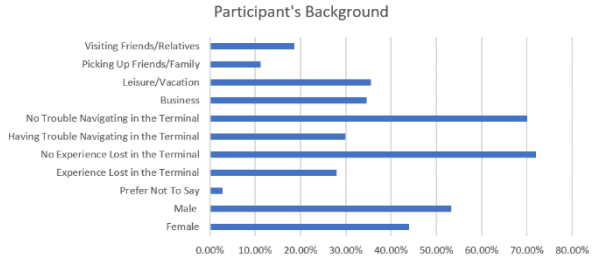


Figure 1 – Participant Background

Participants' backgrounds can impact the external reliability or generalisation of the research results. The researcher can better understand how outcomes may relate to the broader community if the researcher includes individuals from various age categories, genders, et cetera. In addition, the participants' backgrounds may assist in ensuring that the research's sampling indicates the intended group. An accurate representation increases the reliability of results and enables more remarkable conclusions accuracy (Creswell, 2017). According to the survey result, all participants are Indonesian, and no participants are under 18. Figure 1 interprets the analysis of participants' backgrounds where it is defined that from 107 participants, more than 50% of participants are male and more than 40% are female, while less than five per cent of participants prefer not to say.

Furthermore, the participant's purposes for going to the airports are mostly doing business (work in the airport or travel for work) and leisure/vacation, which in total got, 60%. Moreover, 70% of the participants that took this survey had no experience loss or issue regarding the orientation with wayfinding in the terminal. In conclusion, it can be said that the people who participated in this survey are familiar with the content based on their experience and background with Indonesian airports. Therefore, this can help the author get an accurate result since a good result depends substantially on having participants who comprehend the subject matter.

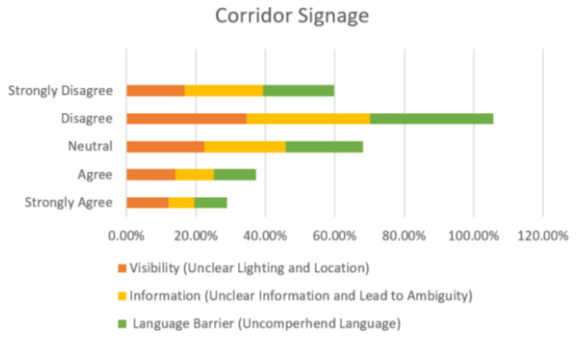


Figure 2 – Corridor Signage

Regarding the result of the online survey, the participants are satisfied with the corridor signage. It is presented in Figure 2 that there are three variables regarding the corridor signage. Overall, the participants who select "Disagree" and "Strongly Disagree" with the statement that the visibility of corridor signs is unclear (lighting and location), the corridor signs give unclear information regarding the direction of a place and lead to the ambiguous decision and the language in wayfinding is uncomprehending (language barrier) are dominant.

Therefore, the result defines that the visibility of the corridor signage in Indonesia is clear, where the location and the lighting are appropriate so that it can be noticed easily. In addition, the details on the signage corridor remain clear to the participants, which does not lead to ambiguity when people find directions. Furthermore, the participants also believe that the language of corridor signage is comprehending, which is easy to understand. However, there are still numerous participants who choose "Strongly Agree", "Agree", and "Neutral" to the statement above. It indicates that those people are having trouble with the corridor signage.

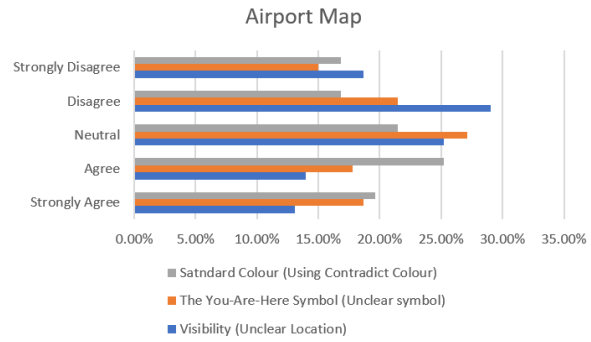


Figure 3 – Airport Map

The result regarding the airport map is different to the corridor signage. As displayed in Figure 3, there are three variables to ask for the result about the airport map in Indonesian airports. Visibility of the airport map, you-are-here symbol and the standard colours of the airport map. On the first variable, participants tend to disagree with the statement that was saying the visibility of airport maps in Indonesian airports is unclear. Most participants disagree with the statement that it is challenging to see airport maps in Indonesian airports, as this is an accepted view among them. Most respondents chose "Disagree" or "Strongly Agree" as their response. One conclusion derived from this is that the visibility of airport maps is clear to most participants.

However, concerning the second variable, the percentage of participants who agree with the statement and those who disagree with it are equal. Furthermore, on the third variable, most respondents chose either "Agree" or "Strongly Disagree" with the statement that the airport map provides information with contradictory standard colours, which will lead to uncertainty. In conclusion, people still face various issues concerning the airport map in Indonesian airports.

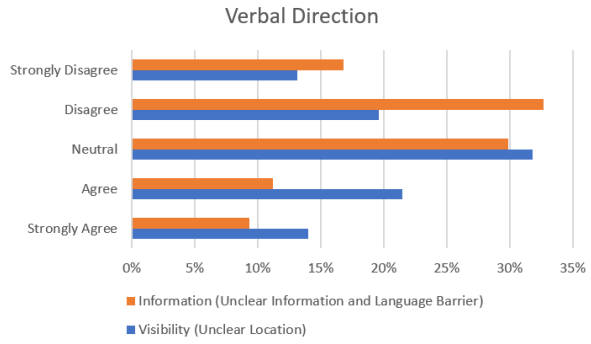


Figure 4 – Verbal Direction

Verbal direction is also crucial since numerous people may ask the airport staff to guide them to their destinations. They are either perplexed by the visual directions or have limited time to comprehend their precise position properly. Airport administrators and airlines jointly administer large airports' information desks and customer service facilities. Additionally, customer service agents are stationed throughout the terminals and frequently at arriving areas to help customers (Andre, 1298).

Figure 4 provides the results of the verbal direction in Indonesian airports. It shows that most participants disagree with the statement. It demonstrated that many people are satisfied with the verbal direction in Indonesian airports. Therefore, the verbal direction in Indonesian airports is believed already suitable to assist people regarding wayfinding if they are confused with visual guidance or have limited time. However, several participants still need to be satisfied with the verbal direction. It leads to improving verbal direction is a solution to enhance the level of customer satisfaction.

Table 2 explains the correlation regarding customer satisfaction calculated by SPSS, the statistical software. The correlation aspect evaluates the collinearity of two variables. A correlation of -1 indicates a perfect negative (linear) connection. A correlation of +1 indicates an ideal positive (linear) relationship. A correlation value of 0 indicates the absence of a linear connection (Morgan et al., 2013). There are two variables regarding customer satisfaction, three variables regarding corridor signages, three variables regarding airport maps and two variables regarding verbal directions.

Overall, all variables are correlated with each other. The correlation coefficient was identified between customer satisfaction (variable wayfinding that participants prefer to use and variable wayfinding that needs to be developed) and corridor signages, airport maps and verbal direction variable ratings. In addition, the highest correlation coefficient value was identified between “airport map visibility” and “corridor signage visibility” ratings. It reveals that the visibility of the airport map and the corridor signage in Indonesian airports are clear and noticeable to people.

All those correlations indicate that most participants are concerned with wayfinding as a vital aspect. This led to the discovery that the effect of wayfinding design in Indonesian airports is significant since clear wayfinding assists individuals in navigating complicated

environments, sparing their time and reducing their stress levels. It also helps passengers in terms of efficiency, letting them locate the most effective and fastest paths towards their locations, such as gates, exits, and other facilities. In addition, navigating environments in a new area can be complex, especially when time is limited or there is a language barrier (Caves & Pickard, 2001).

Additionally, wayfinding systems reduce stress and anxiety by providing precise and intuitive direction, thus decreasing the anxiety of becoming disoriented or missing essential connections. Those will lead to enabling individuals to have an optimal journey. Furthermore, the most straightforward and practicable option is to improve customer orientation and wayfinding efficacy through improved management of extant services and amenities. Therefore, the emphasis transfers from physical form to data. Guidance information sources, such as signages and maps, must be considered, especially when attempting to predict the navigational challenges that newcomers will encounter in a particular environment (Andre, 1298).

As a result, all wayfinding variables are correlated to customer satisfaction (variable wayfinding that needs to be developed) ratings since the participants said that wayfinding is essential and their needs must be supported by developing the wayfinding aids. Most participants prefer to use the corridor signage. Therefore, this variable is significant to most participants regarding the orientation of wayfinding in Indonesian airports.

As displayed in Figure 4.18, the first variable with the most votes was the airport map which almost reached 50%, and the second variable was the corridor signage which got more than 30%, while verbal direction only hit less than 20%. In general, it indicates that some people still face issues with wayfinding in Indonesian airports, and people who are already familiar with the wayfinding aids in Indonesia also encourage that wayfinding needs to be enhanced.

This will lead to customer experience enhancement, which relates to customer satisfaction. As mentioned in the previous paragraph, effective navigation creates a favourable customer experience. Individuals may feel more comfortable, secure, and content when navigating an area. This pleasant encounter may result in improved customer satisfaction and an enhanced image of the airport. Therefore, those variables influence customer satisfaction regarding wayfinding in Indonesian airports.

Lam et al. (2003) investigated guidance in the HKIA departure lounge. Passenger navigation is believed to be an essential component of airport terminal planning and design. Assessing the terminal's simplicity of individual guidance is crucial to accomplish practical individual orientation. It is acknowledged that the effectiveness of a passenger's ability to locate a facility is dependent on the visibility index. Levels-of-service standards are an excellent indicator of the building's complex (Lam et al., 2003).

Table.2 Customer Satisfaction Correlations

	Customer Satisfaction (Variable Wayfinding that Participants Prefer to Use)	Customer Satisfaction (Variable Wayfinding that Needs to be Developed)	Corridor Signage Visibility	Corridor Signage Information	Corridor Signage Language	Airport Map Visibility	Airport Map Symbol	Airport Map Standard Colours	Verbal Direction Information	Verbal Direction Visibility
Customer Satisfaction (Variable Wayfinding that Participants Prefer to Use)	1	.814**	.777**	.734**	.742**	.800**	.853**	.882**	.790**	.839**
Customer Satisfaction (Variable Wayfinding that Needs to be Developed)		1	.891**	.859**	.871*	.894*	.917**	.898**	.864**	.912**
Corridor Signage Visibility			1	.939**	.956**	.977**	.934**	.932**	.968**	.927**
Corridor Signage Information				1	.973**	.936**	.928**	.920**	.946**	.916**
Corridor Signage Language					1	.950**	.925**	.929**	.964**	.916**
Airport Map Visibility						1	.938**	.933**	.961**	.934**
Airport Map Symbol							1	.965**	.929**	.968**
Airport Map Standard Colours								1	.934**	.950**
Verbal Direction Information									1	.917**
Verbal Direction Visibility										1

In conclusion, addressing two objectives in the second chapter reveals that wayfinding in Indonesian airports is a crucial aspect for passengers, as most respondents agree that the impact of wayfinding is highly significant. It will help passengers orient themselves, reduce anxiety, and save time. In addition, wayfinding affects customer satisfaction because it relates to the customer's experience. Most respondents requested enhancements to all aspects of wayfinding, such as corridor signage, airport maps, and verbal directions. As a result, it was determined that these variables influence the level of consumer satisfaction in Indonesian airports regarding wayfinding.

2.4 CONCLUSION

The study demonstrated that people prefer corridor signage to help them find directions in the airport, while the airport map is the last option. Moreover, this study proved that every variable of wayfinding is correlated with each other. This research also showed that the relation between "clear wayfinding is vital" and the "development of wayfinding" is natural since most study participants agree that wayfinding tools in Indonesian airports are being developed. In that case, the customers of Indonesian airports required proper wayfinding in terms of orientation. Therefore, the development of wayfinding variables is needed, and the airport map is the most voted to be enhanced. As a result, this could gain the customer's experience and will influence the airport's customer satisfaction level.

3. REFERENCE

Andre, A. D. (1298). HUMAN ORIENTATION AND WAYFINDING IN AIRPORT PASSENGER TERMINALS. *Transportation Research Record*, 25–32. https://trid.trb.org/view/359153

Appleyard, D. (1970). Styles and methods of structuring a city. *Environment and Behavior*, *2*(1), 100–117. https://doi.org/10.1177/001391657000200106/ASSET/001391657000200106.FP.PNG_V03

Atalik, O. (2009). Voice of Turkish Customer: Importance of Expectations and Level of Satisfaction at Airport Facilities. *Review of European Studies*, *1*. https://heinonline.org/HOL/Page?handle=hein.journals/rveurost1&id=63&div=&collection=

Bogicevic, V., Yang, W., Cobanoglu, C., Bilgihan, A., & Bujisic, M. (2016). Traveler anxiety and enjoyment: The effect of airport environment on traveler's emotions. *Journal of Air Transport Management*, *57*, 122–129. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.07.019

Carpman, J. R., Grant, M. A., & Simmons, D. A. (1985). Hospital Design and Wayfinding. *Environment and Behavior*, *17*(3), 296–314. https://doi.org/10.1177/0013916585173002

Caves, R. E., & Pickard, C. D. (2001). The satisfaction of human needs in airport passenger terminals. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, *147*(1), 9–15. https://doi.org/10.1680/TRAN.2001.147.1.9

Chang, Y. C., & Chen, C. F. (2012). Meeting the needs of disabled air passengers: Factors that facilitate help from airlines and airports. *Tourism Management*, *33*(3), 529–536. https://doi.org/10.1016/J.TOURMAN.2011.06.002

Chen, F. Y., & Chang, Y. H. (2005). Examining airline service quality from a process perspective. *Journal of Air Transport Management*, *11*(2), 79–87. https://doi.org/10.1016/J.JAIRTRAMAN.2004.09.002

Correia, A. R., Wirasinghe, S. C., & de Barros, A. G. (2008). A global index for level of service evaluation at airport passenger terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *44*(4), 607–620. https://doi.org/10.1016/J.TRE.2007.05.009

Correia, A. R., Wirasinghe, S. C., & de Barros, A. G. (2008). Overall level of service measures for airport passenger terminals. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *42*(2), 330–346. https://doi.org/10.1016/J.TRA.2007.10.009

Creswell, John. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. SAGE PUBLICATION.

de Barros, A. G., Somasundaraswaran, A. K., & Wirasinghe, S. C. (2007). Evaluation of level of service for transfer passengers at airports. *Journal of Air Transport Management*, *13*(5), 293–298. https://doi.org/10.1016/J.JAIRTRAMAN.2007.04.004

Kalakou, S., Psaraki-Kalouptsidi, V., & Moura, F. (2015). Future airport terminals: New technologies promise capacity gains. *Journal of Air Transport Management*, *42*, 203–212. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.10.005

Kantowitz, B. H., Triggs, T. J., & Barnes, V. E. (1990). Stimulus-Response Compatibility and Human Factors. *Advances in Psychology*, *65*(C), 365–388. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61231-5

Kelley, S. W., & Turley, L. W. (2001). Consumer perceptions of service quality attributes at sporting events. *Journal of Business Research*, *54*(2), 161–166. https://doi.org/10.1016/S0148-2963(99)00084-3

Lam, W. H. K., Tam, M.-L., Wong, S. C., & Wirasinghe, S. C. (2003). Wayfinding in the passenger terminal of Hong Kong International Airport. In *Journal of Air Transport Management* (Vol. 9).

Lemer, A. C. (1992). Measuring performance of airport passenger terminals. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *26*(1), 37–45. https://doi.org/10.1016/0965-8564(92)90043-7

Fewings, R. (2001). Wayfinding and Airport Terminal Design. *The Journal of Navigation*, *54*(2), 177–184. https://doi.org/10.1017/S0373463301001369

Modak, S. K., & Patkar, V. N. (1984). Transport terminal design and passenger orientation. *Transportation Planning and Technology*, *9*(2), 115–123. https://doi.org/10.1080/03081068408717275

Pradhani, S. (2017). Sejarah Hukum Maritim Kerajaan Sriwijaya dan Majapahit dalam Hukum Indonesia Kini. *Download.Garuda.Kemdikbud.Go.Id*, *13*. http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1539467&val=14798&title=SEJARAH%20HUKUM%20MARITIM%20KERAJAAN%20SRIWIJAYA%20DAN%20MAJAPAHIT%20DALAM%20HUKUM%20INDONESIA%20KINI

Rhoades, D. L., Waguespack, B., & Young, S. (2000). Developing a quality index for US airports. *Managing Service Quality: An International Journal*, *10*(4), 257–262. https://doi.org/10.1108/09604520010373136

Weisman, J. (1981). Evaluating Architectural Legibility. *Environment and Behavior*, *13*(2), 189–204. https://doi.org/10.1177/0013916581132004

Yeh, C. H., & Kuo, Y. L. (2003). Evaluating passenger services of Asia-Pacific international airports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *39*(1), 35–48. https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00017-0

Investigating Resilience in Passenger Handling Systems:

a detailed agent-based simulation study in airport terminals

Luisa Wiebringhaus, Idoaldo Jose de Lima*, Johannes Reichmuth
RWTH Aachen University, Faculty of Civil Engineering
Institute of Transport Sciences, Chair for Air Transport and Airports

*** Corresponding author e-mail address**: lima@via.rwth-aachen.de

PAPER ID: SIT 2172

ABSTRACT

Airport terminals have little buffer capacity for potential disturbances, and resilience, i.e., the ability of a system to absorb disturbances and return to its initial state in the shortest possible time, is an important goal in this context. Our goal in this work is to investigate resilience to disturbances in the context of passenger handling systems in airport terminals. To this end, we develop a general disturbance agent-based simulation model for an airport passenger processing system. We extend an event-based model in such a system developed in a previous study, and use detailed attributes for processing times and distributions, especially for the security checkpoint, as inputs and variables to model the agents and their interactions in the terminal. We outline different scenarios and associated relevant parameters for the simulations and explore different countermeasures and mitigation strategies to address the identified problems. By incorporating detailed processing steps into the agent-based simulation model, we can observe how disruptions affect the results of the model at the passenger level. This provides valuable insights into different parameters and strategies that can be used to mitigate the effects of disruptions and maximize the effectiveness of these countermeasures. By taking a passenger-specific view of the input data and selected parameters, the complexity of an airport terminal system and its resilience to disruptions can be understood. Such effects can be predicted and measured, not only when implementing innovative technologies in airport terminals, but also in overall operations.

Keywords: Resilience, Passenger Processing, Airport Terminal, Agent-based Modeling, Simulation.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was partially funded by the German Academic Exchange Service (DAAD)

1. INTRODUCTION

Airport terminals are part of the critical infrastructure of metropolitan areas, and like other such infrastructures, they face many challenges today. In addition to sustainability, cost-effectiveness and increasing passenger volumes, there is a clear technological trend for future systems. These infrastructures have little buffer capacity for potential problems that could lead to lasting effects in the form of supply shortages, significant disruptions to public safety, and other major consequences. (Mattsson & Jenelius, 2015)

Most of the developments by designers and operators to find mitigation strategies focus on the need to thoroughly investigate an appropriate framework for airport operations to deal with issues such as instrument failure, staff strikes, unlawful acts, or prolonged disruptions such as a pandemic, and their impact on the system. (Gudmundsson et al., 2021) In this context, resilience, i.e. the ability of a system to absorb disturbances and return to its initial state in the shortest possible time, is also an important objective. (Hosseini et al., 2016) Thus, our goal in this work is to investigate resilience against disturbances in the context of passenger handling systems in airport terminals.

There are numerous performance studies that focus on the different processing steps that a passenger has to go through in an airport terminal (e.g., Zhao et al., 2020; Zain Elabedeen et al., 2023; Inama et al., 2023). However, most of them focus on an event-based approach and do not use specific processing times and distributions. However, some critical processing steps, such as security control, require more detail in the models. This approach takes into account the complexity and allows the evaluation of the impact this process may have on the overall performance in a passenger-specific manner. (Alers et al., 2013)

To address this gap, we develop a general disturbance agent-based simulation model for an airport passenger processing system, considering detailed times and distributions for departing passengers, especially the several steps included in the security checkpoint phase, as inputs and variables to model agents in the terminal. We outline different scenarios and associated relevant parameters for the simulations and explore different countermeasures and mitigation strategies to address the identified problems. By incorporating detailed processing steps into the agent-based simulation model, we expect our results to allow the observation of how disruptions affect the results of the model at the passenger level.

2. PASSENGER PROCESSING MODELS

An airport terminal is the interface between the necessary ground processes for passengers and is required to be operationally efficient and economically profitable, while providing passengers with an effortless and uncomplicated travel experience. Departing passengers enter the airport terminal from landside and exit via airside. They use the terminal building for access, check-in, security, immigration, customs, and boarding. (Horonjeff et al., 2010)

In a complex system such as passenger processing in airport terminals, trying different scenarios is usually too expensive, too dangerous, or not possible, and in this case, modeling is a valuable resource for management in this industry. (Alodhaibi et al., 2017; Manataki and Zografos, 2010; Grigoryev, 2022) Simulations are particularly useful because the models reproduce complex interactions as a function of time at the right level of abstraction. In the case of disruptions, for example, this is remarkably effective: simulations can predict not only the effects of disruptions (Metzner, 2020a; 2020b), but also the possible outcomes related to countermeasures from a management perspective (Zain et al., 2023; Inama et al., 2023).

When the interaction of passengers with different characteristics is the goal, agent-based models come into play. State dynamics are represented in terms of probabilistic functions that govern agent behavior. Once validated, these simulation models can predict the individual behavior of real users. (Garifullin et al., 2007) In our simulation

model of the airport terminal, we draw attributes from the literature for passenger behavior.

3. RESILIENCE

While simulations provide performance metrics, sensitivity studies evaluate the impact of different scenarios. In the case of disruptions, where it's necessary to observe the state of the system over a period of time and, for example, evaluate its recovery qualities, resilience studies are more useful. (Li and Lence, 2007)

Nan et al. (2014; 2017) define three system properties to characterize resilience: absorptive capacity, adaptive capacity, and restorative capacity. Figure 1 shows the differences between these three properties and the phases of a system's response to a disturbance.

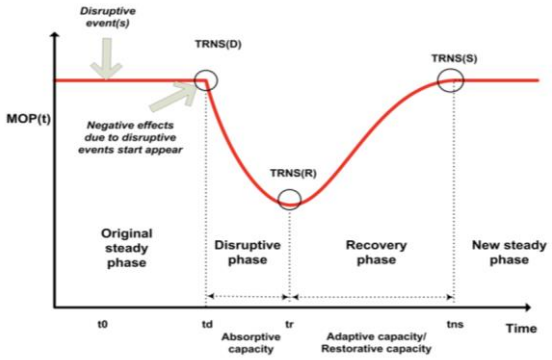


Figure 1 Resilience properties and phases. (Nan et al., 2014)

Initially, there is a disruption of the system, described by the time t_0. As soon as the first performance drop of the system becomes noticeable (t_d), the disruptive phase begins. The course of this phase is characterized by the *absorptive capacity*. The higher the absorptive capacity, the lower the performance drops. The point in time at which the system's performance slowly begins to increase again (t_r) can be seen in the graph as the lowest point and represents the end of the disruptive phase. This is followed by the recovery phase, which lasts until the point in time at which the system again exhibits a constant performance (t_{ns}). In the recovery phase, the system approaches a constant performance level with (*restorative capacity*) or without external influence (*adaptive capacity*). Here, the higher the adaptive and restorative capacity, the faster the recovery phase is completed again, and the new constant performance state is reached. (Nan et al., 2014)

If a system cannot return to its normal state after a disruption, it is said to be a non-resilient system, in which case the system performance deteriorates, leading to a possible collapse of the system. On the other hand, if a system takes a long time to recover and has difficulty reaching the normal state, it is a low resilient system. Highly resilient systems react less intensively to the disturbance and reach the initial state again after a short time. An adaptive system can even achieve an improvement in system performance after the disruption has occurred, as the weakness can be addressed as the system recovers. (Hosseini et al., 2016)

According to Metzner (2020b), in an airport terminal, resilience is the ability to react robustly and quickly to an internal or external disturbance. This means, for example, that when a terminal closure occurs at an airport, passenger throughput recovers to their original levels as soon as possible after the closure is over. This capacity can be described in three different parameters: robustness, recovery speed, and accumulated performance loss. These parameters are calculated according to Equations 1-3 and, in a simulation study, they refer to the system time as a measurement of performance. A combination of the three parameters provides a general resilience indicator, as calculated by Equation 4.

$$R^{t1-} = \frac{p_0}{p_{max}} \tag{1}$$

$$R^{t2} = \frac{t_{disturbance}}{t_{disturbance} + t_{recovery}} = \frac{t_{s,end} - t_{s,start}}{t_0 - t_{s,start}} \tag{2}$$

$$R^{t3-} = \frac{\int_{t_0}^{t_{end}} p_0 \, dt}{\int_{t_0}^{t_{end}} p(t) \, dt} \tag{3}$$

$$R^{t-} = R^{t1-} \, R^{t2} \, R^{t3-} \tag{4}$$

For robustness R^{t1}, system is highly resilient, it does not experience more than a doubling of the performance parameter because of the disturbance ($R^{t1} \geq 0.5$). A system is low resilient if the performance indicator is reduced by a factor of more than 10

because of the disturbance ($R^{t1} < 0.1$). If the resilience parameter lies between these two values, it exhibits medium resilience ($0{,}1 \leq R^{t1} < 0.5$). In addition, the system is said to be non-resilient in the dimension of robustness if the R^{t1} ratio equals 0. Speed R^{t2} and performance loss R^{t3} follow the same principle and the same boundary values. Deriving these values for the resilience indicator R^{t}, the boundary values amount to 0.125 and 0.001. (Metzner, 2020a)

These resilience parameters and limits can be used to evaluate the results of the system times of the simulations according to different disruptive scenarios.

4. TERMINAL CLOSURES

A disturbance or disruption can be defined as an internal or external event that stresses the system and alters system performance. (Gluchshenko and Foerster, 2013). In airport terminals, this can mean a myriad of different possibilities. In addition to indirect disruptions (e.g., weather-related restrictions), the most common events at major German airports, for example, are related to strikes, terminal clearing, IT problems, and handling interruptions. On average, a strike incident lasts 16.57 hours and a terminal evacuation 2.45 hours. (Metzner, 2020a)

A terminal must be closed and evacuated when there is a mix of passengers and baggage that have already passed through security and passengers and baggage that have not yet been screened (i.e., screened and unscreened flows). Such a scenario can occur if, for example, passengers use emergency doors without authorization or if there are errors in the processing of passengers or baggage. In the event of a terminal closure, all passengers who are in the security area or boarding process at the time of the incident must leave the secured area.

The affected area of the terminal is then searched for unauthorized individuals or dangerous items and released upon completion of the search. The duration of such an incident varies depending on the size of the airport and the impact of the disruption. After the screening is complete, all passengers must go through security again. Terminal closures can lead to flight delays and cancellations, even days after the incident, affecting numerous flights and possibly thousands of passengers (Metzner, 2020a; Schubert, 2022).

For our resilience study, we chose terminal closures as the main simulated disruption because airport operators have less time to adjust schedules and take countermeasures compared to strikes, which are usually announced days before they occur. As a result, our simulation study can be constrained to a specific timeframe and the impact of the incident can be depicted in realistic disruption and management scenarios.

5. SIMULATION MODEL

Given the goal of this work, we developed a generic two-method model consisting of discrete event simulation and agent-based simulation following the steps proposed by Enciso et al. (2016): selection of input variables, development of the generic simulation environment, implementation of agents, attributes, and functions, and validation of the model.

Due to the detailed focus in this work on input data to highlight passenger-specific characteristics and behaviors, especially during security screening, attributes are structured according to their impact on behavior, decisions, and time for processing and movement. These attributes either influence the decisions of the passengers, thus creating a realistic simulation, or influence the time spent in the terminal and thus the resilience metric.

We distinguish between basic and extended attributes according to Ma et al. (2011, 2012) and Bueker et al. (2010). Basic attributes are known to the passenger or are specified when the ticket is purchased, while extended attributes are not known to the passenger directly or are specified later.

Basic attributes include: amount of checked and carry-on baggage per passenger; class of travel; use of online check-in; mobility issues and wheelchairs; traveling in groups; companions and visitors. Extended attributes include: random selection for extra security screening; health status; liquids in carry-on baggage; travel experience and purpose &

frequency of travel; drunk & disorderly behavior; technology affinity. Each attribute added or subtracted a few seconds or percentage points from the various processing times, movement speeds, and distributions along the processing steps for these passengers in the terminal.

Table 1 summarizes the proportion attributes used for passengers in this work. Table 2 shows the processing times used for the simulation of the security checkpoint process as an example. Detailed information on all input data can be found in Wiebringhaus (2023).

Table 1 Summary of Passenger attributes

	attribute	expression	distribution
Basic attributes	Luggage definitions (give away)	0 1 2	33% 39% 28%
	Grouping	yes no	50% 50%
	Luggage definitions (hand luggage)	1 2 3 4 5	3% 36% 44% 16% 1%
	Online Check-In	yes no	40% 60%
	Booking Class	Economy Business/First	86% 14%
	Wheelchair	yes no	2% 98%
	Meet and Greeters	yes no	15% 85%
Extended attributes	Alarm	yes no	13% 87%
	Hand luggage liquids	yes no	28% 72%
	PAX health	good poor	93% 7%
	Travel experience	experienced unexperienced	38.50% 61.50%
	Travel purpose	business leisure	38.50% 61.50%
	Behavior	rude drunken	$1{,}92*10^{-5}$% $3{,}84*10^{-5}$%
	Random selection	yes no	10% 90%

Table 2 Summary of Passenger processing times at the security checkpoint

process	attribute	distribution	duration (s)
Place hand luggage on conveyor belt		triangular	(10; 23,16; 39)
	Hand luggage liquids	constant	+20
	Travel experienced	constant	-5
	Travel unexperienced	constant	+20
Control time hand luggage		triangular	(1; 6,06; 20)
	Amount hand luggage		*amount hand luggage
Remove hand luggage from belt		triangular	(12,5; 28,83; 39)
Secondary control			
	Alarm/Random selection	triangular	(60; 199,4; 240)
Other passenger attributes			
	Drunken behavior	uniform	+(100; 200)
	Rude behavior	uniform	+(100; 200)
	Sits in wheelchair	constant	+300

Figure 2 summarizes this model, and each node represents a decision-making process based on the different attributes for each individual agent in the model.

For our model, we considered a generic international hub airport terminal operating a real flight schedule from Frankfurt Airport (FRA) and considering an IATA Busy Day with a night flight ban from 23:00 to 05:00. Passengers arrive at the terminal according to their scheduled flights in generic profiles, adjusted to the airline recommendations and the terminal model. (IATA, 2016; Metzner, 2020a).

The number of processing stations along each step followed the analytical method proposed by IATA (2016) and was adjusted interactively through simulations to meet an optimal level of service. The distances between stations were determined by an average in terminals at major hub airports around the world (i.e., FRA, IST, LHR) and translated into a fictitious airport terminal, as shown in Figure 3.

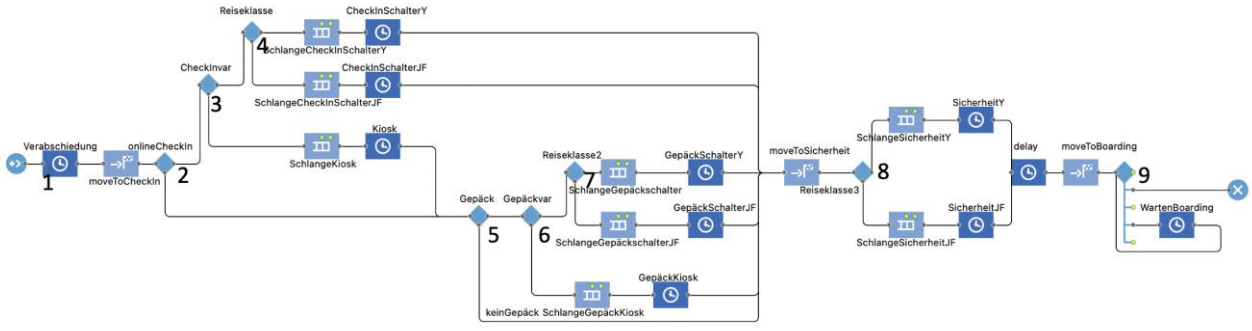


Figure 2 Decision making process in the model.

No other activities, such as restrooms or food and beverage facilities, are included in the model, and the passenger moves from one process station to the next. Due to the stochastic variability associated with the model, we conducted ten simulation runs for each scenario.

To ensure the validity of the model, we followed the steps suggested by Law (2010). First, we selected the passenger attributes according to the objective, and then we collected the available data on these parameters. After comparing their values and checking for outliers, the input data were implemented with different probability distributions. We then developed and validated the model for visual correctness, compared the input data with the data used in the model runs, and performed several sensitivity analyses. Figures 4 and 5 show the observations for the sensitivity analysis for different possible proportions of travel classes and walking speed, respectively , as these were found to have a greater impact on the output. Finally, we implemented the disturbances in the model and documented the results with the resilience estimates.

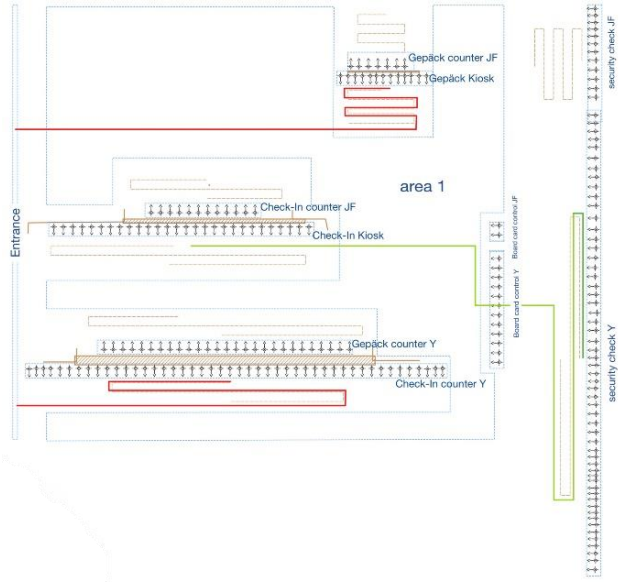


Figure 3 Representation of fictional general airport terminal for an international hub airport.

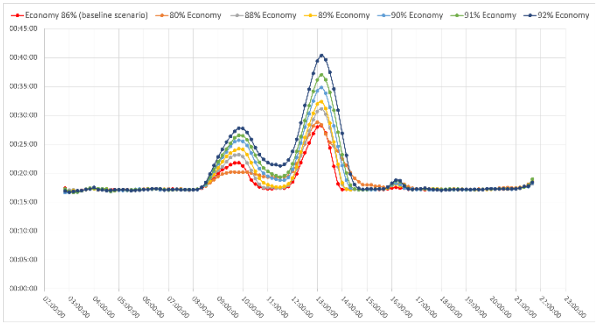


Figure 4 Sensitivity analysis of system times according to travel classes.

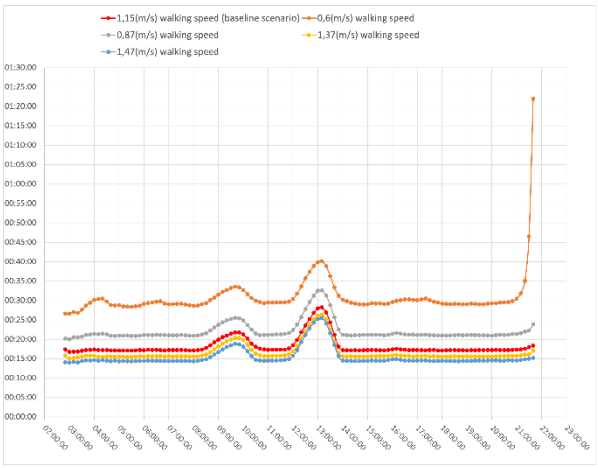


Figure 5 Sensitivity analysis of system times according to average walking speed.

6. DIRUPTIVE SCENARIOS

A terminal closure lasts between 45 minutes and 5 hours, with an average duration of 2 hours (Metzner, 2020a). To account for this variability, we simulated scenarios of terminal closures lasting 1.5, 2, and 2.5 hours. Due to peak patterns in the flight schedule, we simulated these disruptions at 9:00 AM, 12:00 PM, and 4:00 PM, resulting in nine disruption scenarios that were added to the baseline scenario for comparison.

Figures 6 and 7 show the throughput times of passengers and system quality, respectively, compared to their terminal entry time in 10-minute intervals, both for the baseline scenario and for a 1.5 hour terminal closure starting at 9:00 am. In Figure 5, the base scenario is the benchmark for 100% system quality.

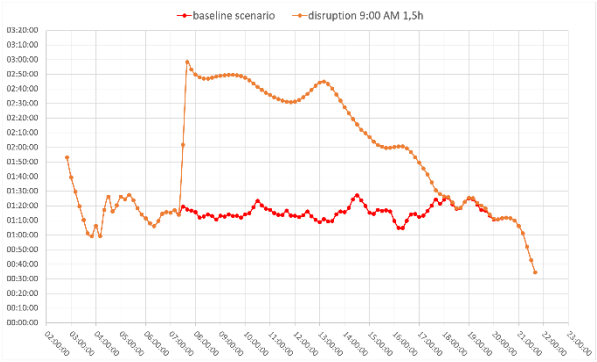


Figure 6 Average throughput times per terminal entrance time in basis and disturbed scenario

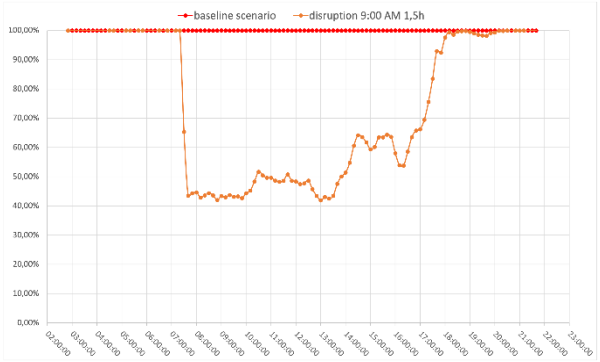


Figure 7 Average system performance per terminal entrance time in basis and disturbed scenario

The two curves first diverge around 7:30 a.m., which can be attributed to the implemented disruption, as there is a jump in throughput times in the disruption scenario (yellow). After the spike in turnaround times, system performance slowly returns to the baseline scenario due to the resulting congestion at the security checkpoint.

Table 2 shows the results of the resilience measures in both numerical values (percentages) and categories (colors).

Robustness (R^{t1}) and accumulated performance loss (R^{t3}) are, in general, on the higher resilience range, except for longer disturbances (i.e. 2.5 hours duration). Recovery speed (R^{t2}), on the other hand, exhibits, in general, rather low or no resilience.

In most scenarios, the system is unable to return to baseline quality within the simulated time frame (i.e., by the end of the day), either because the disruption occurs later in the day, too close to a peak hour, or for too long. We observed that the resilience performance for robustness tends to depend primarily on the duration of the disruption, while for recovery speed and performance loss, the timing of the disruption tends to be just as critical.

7. DISRUPTION MANAGEMENT

As proposed in Inama et al. (2023), we also evaluate two possible countermeasures in the face of terminal closures: increasing the number of security counters in the short term or diverting part of the passenger flow to another terminal.

Increasing the number of security lanes in the short term is a cost-effective measure (IATA, 2016). We modeled a 15% increase in capacity for a period of 5 hours, as shorter durations have little impact on system resilience (Inama et al., 2023). In the case of a decentralized security screening system, passengers are no longer processed at a single security checkpoint, but can choose between two possible security checkpoints implemented as different terminals. For this to happen, passengers must be able to change terminals after passing through the security checkpoint without leaving the secured area (IATA, 2016).

Table 1 Resilience results among disruptive scenarios

Moment:	**9:00 AM**			**12:00 PM**			**4:00 PM**		
Duration:	**1,5h**	**2h**	**2,5h**	**1,5h**	**2h**	**2,5h**	**1,5h**	**2h**	**2,5h**
R^{t1}	62.9%	54.0%	47.4%	62.1%	53.5%	46.9%	61.1%	52.7%	46.3%
R^{t2}	13.4%	16.5%	0.0%	16.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
R^{t3}	59.1%	50.8%	43.8%	64.8%	56.7%	49.6%	79.0%	71.3%	64.6%
R^{t}	5.0%	4.5%	0.0%	6.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

very high	high	mid	low	very low	none

In most scenarios, the system is unable to return to baseline quality within the simulated time frame (i.e., by the end of the day), either because the disruption occurs later in the day, too close to a peak hour, or for too long. We observed that the resilience performance for robustness tends to depend primarily on the duration of the disruption, while for recovery speed and performance loss, the timing of the disruption tends to be just as critical.

8. DISRUPTION MANAGEMENT

As proposed in Inama et al. (2023), we also evaluate two possible countermeasures in the face of terminal closures: increasing the number of security counters in the short term or diverting part of the passenger flow to another terminal.

Increasing the number of security lanes in the short term is a cost-effective measure (IATA, 2016). We modeled a 15% increase in capacity for a period of 5 hours, as shorter durations have little impact on system resilience (Inama et al., 2023). In the case of a decentralized security screening system, passengers are no longer processed at a single security checkpoint, but can choose between two possible security checkpoints implemented as different terminals. For this to happen, passengers must be able to change terminals after passing through the security checkpoint without leaving the secured area (IATA, 2016).

Like Inama et al. (2023) results, speed (R^{t2}) and performance loss (R^{t3}) tends to improve with a temporary increase of counters, while robustness (R^{t1}) shows no impact, as it primarily on the duration of the disturbance. Adopting a decentralized security system, on the other hand, tends to improve robustness (R^{t1}) and especially performance loss (R^{t3}), while speed (R^{t2}), doesn't show the same level of improvement across all scenarios.

In general, our results agree with Inama et al. (2023): unlike increasing the capacity temporarily in some cases, a decentralized security system can absorb the negative consequences of a terminal closure given the correct circumstances. Our robustness (R^{t1}) in our model presents slightly better values, while performance loss (R^{t3}) has slightly worse values. Recovery speed (R^{t2}), or the time taken for recovery of the system was higher in our findings than in the event-based model developed in Inama et al. (2023). This deviation is probably because of our further characterization of passenger behavior into detailed times and variations. Both models can be considered comparable, and this equivalence indicates that our detailed approach can produce similar results.

9. OUTLOOK

In this work, we explored the agent-based modeling of an airport terminal and the determination of resilience in passenger processing using attributes embedded in the model agents. Our modeling focused on the main bottleneck of the airport terminal, especially during a closure event (Alers et al., 2013), the security checkpoint.

We extend the event-based model proposed in Inama et al. (2023), and use detailed processing times and distributions as inputs and variables to model the agents and their interactions in the terminal. Given the limited availability of data, we conducted an extensive literature review on the myriad of attributes used as inputs in the model. (Appel et al., 2011) For example, we found that the presence of wheelchair users, the purpose of the trip, and the general walking speed of the users can have a significant impact on the average system time.

We developed a model where individual passengers behave differently based on their unique attributes, thus inducing individual system times. By incorporating detailed processing steps into the agent-based simulation model, we can observe how perturbations affect the results of the model at the passenger level.

This model can later be enhanced to represent a very realistic behavior of passengers in the terminal. In doing so, we provide valuable insight into various parameters and strategies that can be used to mitigate the effects of disruptions and maximize the effectiveness of these countermeasures. Future work may explore different variations of such attributes, e.g., related to the implementation of new

technologies and procedures, or in the overall operations at the terminal according to new observations.

Our next step is to implement specific decision patterns in the model to simulate the emergence of disruptive scenarios through these attributes. By using resilience attributes, we expect our model to properly capture the impact of disruptions faced by the terminal system, especially during the disruption and subsequent recovery phases.

10. REFERENCES

Alers, T., Kellner, S. & Classen, A. (2013). More Input - Generic Data for Microscopic Airport Simulation. *Proceedings of the 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*.

Alodhaibi, S., Burdett, R., Yarlagadda, P. (2017). Framework for Airport Outbound Passenger Flow Modelling. *Procedia Engineering*, 174, 1100-1109.

Appel, H., Alers, T., Bueker, K., Kellner, S. (2011). *Overcoming limitations of data availability regarding airport and aircraft ground processes*.

Bueker, K., Kellner, S., Appel, H., Alers, T. (2010). *Generische Terminalmodelle - Simulationen Landseitiger Terminalprozesse*.

Enciso, J., Vargas, J., Martínez, P. (2016). *Modeling and Simulation of Passenger Traffic in a National Airport*.

Garifullin, M., Borshchev, A., Popkov, T. (2007). *Using Anylogic and agent-based approach to model consumer market*.

Gluchshenko, O., Foerster, P. Performance based approach to investigate resilience and robustness of an ATM System. *Proceedings of the Tenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Chicago, 2013.

Grigoryev, I. 2022. AnyLogic in three days - A quick course in simulation modeling.

Gudmundsson, S. V., Cattaneo, M., Redondi, R. (2021). Forecasting temporal world recovery in air transport markets in the presence of large economic shocks: The case of COVID-19. *Journal of Air Transport Management, 91*. doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.102007

Gudmundsson, S. V., Cattaneo, M., Redondi, R. (2021). Forecasting temporal world recovery in air transport markets in the presence of large economic shocks: The case of COVID-19. *Journal of Air Transport Management, 91*. doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.102007

Horonjeff, R., McKelvey, F. X., Sproule, W. J., Young, S. B. (2010). Planning and Design of Airports. McGraw-Hill Education.

Hosseini, S., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E. (2021). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety, 145*. doi: 10.1016/j.ress.2015.08.006

IATA (2016). Airport Development Reference Manual, Montreal.

Inama, L., Lima, I. J., Reichmuth, J. (2023). Resilience against disruptive scenarios in passenger handling at airport terminals and corresponding management actions. *Proceedings of the 2023 ATRS World Conference*.

Law, A. (2010). *How to Build Valid and Credible Simulation Models*.

Li, Y., Lence, B. J. (2007). Estimating resilience for water resources systems. *Water Resources Research, 43*.

Ma, W., Fookes, C., Kleinschmidt, T., Yarlagadda, P. K. D. V. (2012). Modelling Passengers Flow at Airport Terminals - Individual Agent Decision Model for Stochastic Passenger Behaviour. *Proceedings of the International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies, and Applications*.

Ma, W., Kleinschmidt, T., Fookes, C., Yarlagadda, P. (2011). Check-in processing: Simulation of passengers with advanced traits. *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1778-1789*.

Manataki, I. E., Zografos, K. G. (2010). Assessing airport terminal performance using a system dynamics model. *Journal of Air Transport Management, 16, 86-93*.

Mattsson, L. G., Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 81*. doi: 10.1016/j.tra.2015.06.002

Metzner, N. (2020a). Untersuchung der Resilienz von Flughafenterminalsystemen auf Basis analytischer und simulationsbasierter Methoden. *PhD Thesis, RWTH Aachen University*.

Metzner, N. (2020b). Simulation based analysis of airport terminal resilience with a generic terminal model. *Proceedings of the 2020 AIAA Aviation Forum*.

Nan, C., Sansavini, G. (2017). A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety, 157*. doi: 10.1016/j.ress.2016.08.013

Nan, C., Sansavini, G., Kröger, W., Heinimann, H. (2014). A quantitative method for assessing the resilience of infrastructure systems. *Proceedings of the PSAM 2014 - Probabilistic Safety Assessment and Management*.

Schubert, A. (2022). Wie es zur Sperrung im Flughafen kam. *Süddeutsche Zeitung, 08.08.2022*.

Wiebringhaus, L. (2023). Systematische agentenbasierte Modellierung von Resilienz bei der Passagierabfertigung in Flughafenterminals. *Bachelor Thesis. RWTH Aachen University*.

Zain Elabedeen, M., Lima, I. J., Reichmuth, J. (2023). Impact of new technologies on resilience against disruptions in passenger processing at international airports: a simulation study. *Proceedings of the 2023 AIAA Aviation Forum*. Doi: 10.2514/6.2023-4412

Zhao, Z., Zhao, Y., Li, X., Li, Z. (2020). Agent-Based Modeling and Analysis of Airport Passenger Differentiated Security Strategy. *Proceedings of the 12th International Conference on Computer Modeling and Simulation*.

MODELING AND RESOURCES' OPTIMIZATION FOR PEOPLE PROCESSING IN SECURITY CHECKPOINTS OF BRAZILIAN AIRPORTS

MICHELLE SALGADO FERREIRA ARCÚRIO*, LUIZ FERNANDO DE ABREU PIMENTA, BÁRBARA CARVALHO DE AZEVEDO*, FABIANA SERRA DE ARRUDA

UNIVERSITY OF BRASILIA (UNB), GRADUATE PROGRAM IN TRANSPORTATION (PPGT)

*** Corresponding author e-mail address**: michelle.arcurio@gmail.com, barbaracazevedo@yahoo.com.br

PAPER ID: SIT2271

ABSTRACT

Using the theory of descriptive analysis of scenarios, the research aims to identify procedures, resources and layouts that should improve the screening checkpoints process. It was carried out at three Brazilian airports and was based on testing different configurations, observing the Brazilian regulations in force at the time of the study. These configurations evaluated, among other aspects: a) effects of: (i) making trays available for depositing items, still in the screening throughput; (ii) guidance to passengers on the removal of metallic items from the body to avoid the alarm of the walk-through-metal-detector (WTMD); (iii) the increase in the number of security checkpoints served by the security professional "flow controllers"; b) effects and reactions of passengers in face of pat down without the use of the hand-held metal detectors (HHMD); c) efficiency in allowing the passenger who "alarmed" the WTMD to return, on his own, to remove possible metallic objects that caused the "alarm", instead of being directly searched by the HHMD; d) composition of security checkpoints modules with varying numbers of WTMD, x-rays and professionals; e) reduction in the number of security professionals working in the employee security checkpoints; and f) expansion of the number of security checkpoints supervised by each professional who exercises the role of supervisor. The results were portrayed by: drawing each security checkpoint configuration scenario; the definition of operational processing capacity at the security checkpoints, which includes the evaluation of: the number of passengers who passed through the WTMD, the number of WTMD alarms activated, the number of passengers processed and the number of manual search carried out; and analysis of each established configuration efficiency.

Keywords: Security checkpoint configuration, Configuration, Modeling, Passenger processing; People processing.

1. INTRODUCTION

The security checkpoint is a component of the airport system that constitutes a crucial security point, being a contributory element of one of the national security levels, with international impact, depending on the nature of the airport operation. According to Tamasi & Demichela (2011), Aviation Security - AVSEC is not only a responsibility of the civil aviation industry, but it is also a matter of national security.

Regarding the analysis of the elements that make up the security checkpoint, Yoo, & Choi (2006) sought to explore factors and elements related to the security checkpoint that need improvement to increase the possibility of detecting prohibited items during the passenger screening process.

The effectiveness increase of a security control performance was also associated with the increase in the sensitivity of the WTMD and, after the adoption of this measure, the increase in the frequency of additional security measures, in addition to the selection of AVSEC professionals and the establishment of frequency of manual search (SKORUPSKI & UCHROŃSKI, 2016).

For the reasons set out above, the security checkpoint should be seen as one of the components that integrate the airport system and not as a specific system. Therefore, it must be structured and located so as not to hinder the flow of passengers at the airport and to facilitate the processing of users to air transport.

For Turner (2008), the use of scenarios makes the organization think systematically and strategically about the variety of potential results, without the influence of its own biases, opinions and prejudices. For this author, scenario planning allows the organization to reflect and rehearse several possible futures and avoid complacency or fear of changing a favorable present situation. This study is far from exhaustive the exploratory analysis of the possible configurations and compositions of security checkpoints at airports but represents a regulatory and operational advance in a strict sense.

This advance, as highlighted by Askew (2004), is fundamental and can make a difference to AVSEC and the performance of a security checkpoint. For the author, the review and changes, whenever necessary, in processes and procedures, as well as the implementation of principles relating to the search for high-tech and precise security equipment and the adequate design of a security checkpoint is essential to achieve the state of the art in aviation security.

In a study on the factors that influence airport security performance, Yoo (2009) highlighted that quality of service is one of the most important factors in the air transport industry and that security controls, which are also exercised in security checkpoints, are closely related to the perception of this quality by users of this mode.

Thus, the objective of this article is to identify configurations for security checkpoints capable to attend different operational realities of Brazilian airports and to increase the application of procedures, resources and layouts used in the security screening process.

2. METHOD

The initial proposal for data collection involved only one airport (Airport 1 – Arpt 1). However, during the execution of the search, it was verified the need for a broader sampling with varied profiles of airports for the intended evaluations. In this sense, other two airports were included in the research universe (Airports 2 and 3 – Arpt 2 and Arpt 3), all airports operated by the same airport operator during the study.

It is noteworthy that the choice of the selected airports considered the following aspects: availability of representatives of the aerodrome operators, proximity to the National Civil Aviation Agency – Brazil (ANAC) unit, availability of human resources, as well as the limited period for carrying out the study.

In total, 9,575 (nine thousand five hundred and seventy-five) passenger and employee screening procedures that went through the security checkpoints during the studies were evaluated at the three airports.

The research was initially structured with different modulations of passenger and employee security checkpoints. Furthermore, these modulations evaluated, among other aspects: (i) the effects of making trays available for passenger depositing items while still in the screening queue; (ii) effects of guidance to passengers on the removal of metallic items from the body, in order to avoid the alarm of walk-

through (WTMD); (iii) effects of the increase in the number of screening modules attended by professional “flow controllers”; (iv) passengers' effects and reactions to the manual search without the use of a handheld metal detectors (HHMD); (v) efficiency in allowing the passenger who “alarmed” the WTMD to return, on his own, to remove possible metallic objects that may have caused the “alarm”, instead of being subjected directly to the search with the HHMD; (vi) composition of security modules with varying numbers of WTMD, X-ray equipment and professionals; (vii) reduction in the number of professionals working in employee security checkpoints; and (viii) increase the number of security checkpoints supervised by each professional.

3. RESULTS

The scenarios presented were not analyzed at all airports, especially considering the results of the analyzes carried out at the first airport. Furthermore, throughout the study, new scenarios were identified to be analyzed, so some of them were not analyzed at the first airport. In this sense, it is also highlighted that, despite being indicated sequentially, the scenarios were not necessarily analyzed in the order presented, so that, for each analysis carried out, the airports where they were analyzed are indicated.

3.1 Analysis 1 – Passenger security checkpoint module without trays and without passenger guidance

The analysis was carried out at Airport 1 and Airport 2 (in two modules, indicated by the average result - Arpt 2 Avg.). In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was quantitatively verified, in a normal situation, respecting the provisions of ANAC Resolution nº 207 (ANAC, 2011) and IAC 107-1004A (DAC, 2005), without guidance to the passenger and without the availability of trays in the passenger formation area queue, so that the passenger could deposit the metallic objects. Table 1 presents the results obtained for the analysis.

Table 1 – Results – Analysis 1

	Arpt 1	**Arpt 2** Avg.	**Avg.**	**SD**
People through WTMD	191	209.5	203	10
WTMD Alarms	19	19	19	1
People processed	172	190.5	184	10
Manual searches	0	0	0	0

It is possible to conclude that there are no significant discrepancies (standard deviation - SD) between the number of passengers processed at different airports and checkpoint modules, with an average (avg. people processed) processing capacity of 184 passengers/hour in the domestic security checkpoint.

3.2 Analysis 2 – Passenger security checkpoint module with trays and without passenger guidance

The analysis was also carried out at Airports 1 and 2 (in two modules). In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was quantitatively verified, in a normal situation, respecting the provisions of ANAC Resolution nº 207 (ANAC, 2011) and IAC 107-1004A (DAC, 2005), with the provision of trays in the queue formation area, but without instructions for the passenger to place the metallic objects on it. Table 2 presents the results obtained for the analysis.

Table 2 – Results – Analysis 2

	Arpt 1	**Arpt 2** Avg.	**Avg.**	**SD**	**Dif. 1 and 2**
People through WTMD	187	201.5	197	11	6
WTMD Alarms	13	23	20	6	1
People processed	174	178.5	177	8	-4%
Manual searches	1	0	0	0,6	0

It is possible to conclude that there are no significant discrepancies between the number of passengers processed at different airports and checkpoint modules, with an average processing capacity of 177 passengers/hour. There is no gain in passenger processing efficiency when trays are made available for depositing metal objects in the queue formation area, with there even being a 4% reduction in the evaluations made, comparing the difference between analysis 1 and 2 (Dif. 1 and 2).

Even though the trays were available, it was found that most passengers did not use them to

arrange their metal objects. This fact may reflect the passenger's lack of knowledge about the purpose of the tray provided in the queue formation area.

3.3 Analysis 3 – Passenger security checkpoint module with trays and without passenger guidance

The analysis was also carried out at Airports 1 and 2 (in two modules). In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was quantitatively verified, in a normal situation, respecting the provisions of ANAC Resolution nº 207 (ANAC, 2011) and IAC 107-1004A (DAC, 2005), with the provision of trays and an advisor (APAC - civil aviation protection officer - with the function of guiding passengers) in the queue formation area so that the passenger could remove the metallic objects and place them on the tray. Table 3 presents the results obtained for the analysis.

Table 3 – Results – Analysis 3

	Arpt 1	**Arpt 2** Avg.	**Avg.**	**Dif. 3 and 2**
People through WTMD	222	254	243	43
WTMD Alarms	19	23.5	20	0
People processed	205	232	223	21%
Manual searches	0	0	0	0

It is possible to conclude that there is a discrepancy of approximately 12% between the processing of the two airports, and, on average, the processing capacity was 223 passengers/hour. There was a 21% efficiency gain in passenger processing capacity when trays are made available in the queue and there is a person instructing the passenger to remove metal objects from their bodies and place them on the tray or in their backpacks.

3.4 Analysis 4 – Passenger security checkpoint module without a flow controller per module

The analysis was carried out at Airport 1 (in two modules). In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was verified, quantitatively and qualitatively, using a flow controller at the beginning of the queue, so that it could serve two inspection modules. Table 4 presents the results obtained for the analysis.

Table 4 – Results – Analysis 4

	Arpt 1 Avg.	**Avg.**	**Dif. 6 and 4**
People through WTMD	175	175	105
WTMD Alarms	26	26	6
People processed	149	149	-42%
Manual searches	0.5	1	1

For this analysis, trays and OPI (pre-inspection guide) were used in the queue formation area, so the analysis in question represents an increase in relation to Analysis 3. Art. 3rd, IV of ANAC Resolution nº 207/2011 (ANAC, 2011) was not applied, considering the good results verified in Analysis 6, presented below.

It was found that the efficiency in passenger processing is greatly reduced when there is no flow controller next to the x-ray, losing efficiency of 42%, when compared to Analysis 6.

In addition to the low efficiency, the checkpoint module team reported:

- the passenger is lost in the module without knowing exactly how to proceed;
- the x-ray operator often had to stop his activity, as suitcases get stuck in the x-ray entrance due to poor placement of the luggage on the conveyor belt, which causes a loss of concentration for the x-ray operator;
- visualization of the luggage through x-ray is difficult due to the inadequate positioning of the luggage on the conveyor belt;
- when an agent has to be absent to carry out a manual search, for example, it creates turmoil, given the lack of an APAC to guide and control the flow of passengers through the gantry.
- difficulty in controlling the flow and at the same time correctly positioning the luggage on the x-ray conveyor of the two security checkpoint modules.

For the reasons explained, as well as the results, this evaluation was not carried out at Airports 2 and 3.

3.5 Analysis 5 – Passenger security checkpoint module with direct manual search without using HHMD

The purpose of this analysis was to verify the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module, carrying out a manual search on the carpet, after triggering the WTMD alarm, without applying the HHMD, when consented by the passenger.

Considering the low number of passengers with unresolved alarms, especially due to the non-application of Art. 3rd, IV of ANAC Resolution nº 207/2011 (ANAC, 2011), the assessment was remodeled, so that passengers who had their luggage submitted to manual search were also manual searched on the security checkpoint module mat, with the passenger's consent. The analysis was carried out at Airports 1 (international security checkpoint) and 2 (in two modules). Table 5 presents the results obtained for the analysis.

Table 5 – Results – Analysis 5

	Arpt 1 Int	**Arpt 2** Avg.	**Avg.**	**Dif. 5 and 3**
People through WTMD	261	198.5	219	-24
WTMD Alarms	7	17	14	-6
People processed	254	181.5	206	-8%
Manual searches	12	6.5	12	12

There was a considerable difference (29%) in the number of passengers processed at Airport 1 compared to Airport 2. Furthermore, it was observed that a greater number of passengers were subjected to manual search of hand luggage and, consequently, to personal manual search, at Airport 1, compared to Airport 2. These results are different from the results verified in Analysis 3, in which a greater number of passengers processed in Airport 2 was observed compared to Airport 1. It is also noteworthy that the present analysis, carried out at Airport 1, was carried out in an international security checkpoint, that is subject to specific rules related to screening, especially considering the transport of liquids (rule in force at the time: Resolution ANAC nº 207/2011 – ANAC, 2011).

In an interview with passengers, regarding the location of the manual search, at Airport 2, 85% of passengers stated that they preferred to be manual searched outside the reserved room and only 15% felt embarrassed about being manual searched on the screening mat; at Airport 1, 8% of passengers declared themselves embarrassed by the manual search procedure on the screening mat and 92% were in favor of a manual search outside the reserved area.

When changing the screening procedure applied in this analysis, an 8% reduction in processing capacity was found, taking as a basis the module of Analysis 3 – Passenger security checkpoint module with trays and guidance, which, based on the results of the present study, it began to be considered as a standard module. In this sense, innovation stands out in relation to the regulations previously in force, so that a contribution to Brazilian civil aviation is observed, considering the identification of reliable and already tested alternatives.

3.6 Analysis 6 – Passenger security checkpoint module with non-application of Art. 3rd, IV of ANAC Resolution nº 207/2011

In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was quantitatively verified, without applying Art. 3rd, IV of ANAC Resolution nº 207/2011 (ANAC, 2011), that is, when the passenger passes through the WTMD and it is activated, and such passenger is not directly subjected to screening with a HHMD, having the possibility of returning to the WTMD to remove the objects causing the alarm. Furthermore, the analysis in question included the availability of trays and an advisor (APAC with the function of guiding passengers) in the queue formation area, so that the analysis in question represents an increase in relation to Analysis 3. Furthermore, the analysis in question was carried out at Airports 1 (in two modules) and 2 (in two modules). Table 6 presents the results obtained for the analysis.

Table 6 – Results – Analysis 6

	Arpt 1 Avg.	**Arpt 2** Avg.	**Avg.**	**Dif. 6 and 3**
People through WTMD	255	304.5	280	37
WTMD Alarms	17.5	27	20	0
People processed	237.5	277.5	258	16%
Manual searches	1	0	0,5	0,5

There is a discrepancy of approximately 17% between the processing of different airports

(Airport 2 had greater processing, as observed in Analysis 3), and, on the general average, they have a processing capacity of 258 passengers/hour.

It is possible to conclude that there is an average efficiency gain of 16% in passenger processing capacity when allowing the passenger to return to the WTMD without subjecting the passenger directly to search with DMM.

At Airport 2, it was found that, considering the average alarm level of the WTMD, 66% of passengers returned to the WTMD on their own, before the APAC approached to carry out the search with HHMD.

Analysis 6 was also applied at Airport 3. In the study at Airport 3, there was no availability of trays or OPI in the queue formation area and for this reason the comparative analyzes between applying or not article 3rd, IV of Resolution nº 207/2011 (ANAC, 2011), were carried out separately from the analyses for Airports 1 and 2. Table 7 presents the results obtained for the analysis carried out at Airport 3, with the application of article 3rd, IV of Res. 207 (ANAC, 2011) (Arpt 3 – 01), and without the application of the item (Arpt 3 – 02). The analyses were carried out at the same time in different modules, considering the application and non-application of the mentioned article.

Table 7 – Results – Analysis 6 – Arpt 3

	Arpt 3 01	**Arpt 3** 02	**Dif. 01 and 02**
People through WTMD	222	227	5
WTMD Alarms	38	15	-23
People processed	184	211	13%
Manual searches	1	0	-1

At Airport 3, the period with a minimum of 170 passengers per security checkpoint module were selected for comparison, for a continuous flow assessment to enable comparison. At Airport 3 there was an average efficiency gain (13%), comparing the application and non-application of art. 3rd, IV of Res. nº 207/2011 (ANAC, 2011), a value close to that one found at Airports 1 and 2, 16%.

It is also verified that the number of WTMD's alarms reduced considerably from 38 to 15, which may have been caused by a behavioral factor of the passenger who waited in line and observed the removal of metallic objects by the passenger who was being screened by WTMD, a factor not noticed by the passenger, when applying art. 3rd, IV of Res. nº 207/2011 (ANAC, 2011). In the case of Airports 1 and 2, it is believed that this difference did not exist, because the passenger was being guided by the OPI in both Analysis 3 and 6.

3.7 Analysis 7 – Passenger security checkpoint module with 2 WTMD and 1 x-ray

In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was quantitatively verified, using 2 WTMD, 1 x-ray and 5 APAC. Furthermore, the analysis included the availability of trays and an advisor (APAC with the function of guiding passengers) in the queue formation area and was carried out without the application of art. 3rd, IV of Res. nº 207/2011 (ANAC, 2011), so that the analysis represents an increase in relation to Analysis 6. Analysis 7 was carried out at Airport 1 and Table 8 presents the results obtained for the analysis.

Table 8 – Results – Analysis 7

	Arpt 1	**Dif. 7 and 3**
People through WTMD	173	70
WTMD Alarms	16	4
People processed	157	-42%
Manual searches	0	0

In this analysis, there was a reduction in processing capacity of 42%, demonstrating that the most impactful part of the screening process is related to the processing of hand luggage and not the passenger itself. Analysis 8 confirms this hypothesis, given that the use of 2 x-rays and 1 WTMD increased the process efficiency by 47%.

Due to the low performance demonstrated for this assessment at Airport 1, it was not carried out in the other airports.

3.8 Analysis 8 – Passenger security checkpoint module with 1 WTMD and 2 x-rays

In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was quantitatively verified, using 1 WTMD, 2 x-rays and 06 APAC. Furthermore, the analysis included the availability of trays and an advisor (APAC with the function of guiding passengers) in the queue formation area and was carried out without the application of art. 3rd, IV of Res. nº 207/2011 (ANAC, 2011), so this analysis represents an increase in relation to

Analysis 6. Furthermore, the analysis in question was carried out at Airports 1 and 2. Table 9 presents the results obtained for the analysis.

Table 9 – Results – Analysis 8

	Arpt 1	Arpt 2	Avg.	Dif. 8 and 3
People through WTMD	468	474	471	228
WTMD Alarms	60	40	50	30
People processed	408	434	421	88,7%
Manual searches	0	0	1	1

This analysis showed an increase in the indirect processing capacity of 88.7% of the security checkpoint module and a real gain of 25% in passenger processing, considering the proportionality of processing by APAC.

Furthermore, compared to two standard modules, this type of configuration for the security checkpoint module represents a 15.4% reduction in labor employment, as well as a reduction in the number of equipment required (1 HHMD and 1 WTMD) and, also, the reduction of physical space required to install screening equipment.

3.9 Analysis 9 – Passenger security checkpoint module with 2 WTMD and 2 x-rays

In this analysis, the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module was quantitatively verified using two standard security checkpoint modules, allowing mutual assistance between teams. Furthermore, this analysis included the availability of trays and an advisor (APAC with the function of guiding passengers) in the queue formation area and was carried out without the application of art. 3rd, IV of Res. nº 207/2011 (ANAC, 2011), so that the analysis in question represents an increase in relation to Analysis 6. Furthermore, the analysis in question was carried out only at Airport 1, given the limited time available to carry out the study. Table 10 presents the results obtained for the analysis.

Table 10 – Results – Analysis 9

	Arpt 1	Dif. 9 and 3
People through WTMD	510	66
WTMD Alarms	35	1
People processed	475	-16%
Manual searches	2	2

There is a 16% gain in passenger processing efficiency in the inspection module. It can be seen from this analysis that mutual assistance between the teams prevents the processing of one of the security checkpoint modules from being interrupted when 2 APACs are doing manual search.

3.10 Analysis 10 – Passenger security checkpoint module with 2 WTMD and 2 x-rays and continuous hand luggage manual search

The purpose of this analysis was to verify the operational processing capacity of the passenger security checkpoint module, maintaining an APAC dedicated exclusively to the screening of hand luggage on a random and continuous basis. The module was configured with 2 WTMD, 2 x-rays and 7 APAC (2 flow controllers, 2 x-ray' screeners and 1 professional responsible for manual search) to analyze the impact with a reduction of 1 agent. Furthermore, the analysis in question included the availability of trays and an advisor (APAC with the function of guiding passengers) in the queue formation area and was carried out without the application of art. 3rd, IV of Res. nº 207/2011 (ANAC, 2011), so the analysis in question represents an increase in relation to Analysis 6. Furthermore, the analysis in question was carried out at Airports 1 and 2. Table 11 presents the results obtained for the analysis.

Table 11 – Results – Analysis 10

	Arpt 1	Arpt 2	Avg.	Dif. 10 and 6 (x2)
People through WTMD	385	503	444	-116
WTMD Alarms	34	36	35	-5
People processed	350	467	408	26%
Manual searches	1	0	1	0

Initially, it appears that there is a high difference in passenger processing at Airports 1 and 2. Airport 2 processed 33% more passengers. It was not possible to identify the reasons for this difference, however, it is noteworthy that Airport 2 processed a greater number of passengers, compared to Airport 1 also in Analyzes 3 and 6. On average, 408 passengers were processed, which corresponds to 204 passengers per security checkpoint module.

For comparison with the defined reference, evaluated in Analysis 6, the result of this

evaluation was multiplied by 2, which would correspond to the processing capacity of two modules and, in this case, there was an indirect reduction in processing rate capacity of 26%, when applied to random and continuous manual search. However, this reduction directly corresponds to 10.8%, given that in Analysis 6 a processing rate of 65 pax/APAC/hour is recorded, in Analysis 10, 58 pax/APAC/time are recorded. Given the discrepancy found between the results found at Airports 1 and 2, for the specific procedure, it is suggested that the evaluations be repeated at both airports.

3.11 Analysis 11 e 12 – Employee security checkpoint module with reduction in the number of APAC

The purpose of this analysis was to verify (qualitatively and quantitatively) the capacity to process people in the employee security checkpoint with a reduction in the standard configuration defined in IAC 107-1004A (DAC, 2005), from the removal of 2 APAC (Analysis 12), compared to the standard configuration defined in IAC 107-1004A (DAC, 2005) (Analysis 11).

This assessment was carried out only at Airport 1 during times of greatest demand. Table 12 presents the results obtained for the analysis.

Table 12 – Results – Analyses 11 and 12

	Arpt 1 (11)	**Arpt 1** (12)	**Dif. 12 and 11**
People through WTMD	229	226	3
WTMD Alarms	23	7	16
People processed	206	219	6%
Manual searches	5	1	4

In terms of people processing, there were no impacts on the security checkpoint with the reduction of the flow controller APAC. Tests were carried out on the people identification system and on the hand belongings screening system in the security checkpoint subject to the analysis, one in configuration of Analysis 11 and the other with configuration of Analysis 12 and, in both cases, the results were the same, therefore it is not possible to state that the reduction of an APAC and a Supervisor interfered with the quality of the screening and access control activities.

It is noted that Airport 1 had, at the time, a population of 4,736 authorized people with access to the ARS and that the analyses were carried out at times of greatest demand (shift change) in the security checkpoint.

3.12 Analysis 13 – Increase in the number of inspection modules per AVSEC supervisor

The purpose of this analysis was to qualitatively verify the ability of a supervisor to act effectively in three security checkpoint modules and not just two, in accordance with IAC 107-1004A (DAC, 2005) in force at the time. It is also noteworthy that no vulnerability, reduction in the processing capacity of the modules or difficulty in coordinating the teams was noticed with an increase in the number of inspection modules (2 to 3 modules). However, it is noteworthy that it was noticed that there were cases in which the supervisor did not intervene when he should have done so, for example, when the APAC was discarding items and it was necessary to stop the module, adding to the dispersion of the team.

4. DISCUSSION

The analyses carried out led to the following conclusions:

a) Passenger guidance in the queue formation area:

The placement of trays in the queue formation area without instructions for passengers to remove metal objects did not demonstrate an improvement in the efficiency of passenger processing, even causing a small reduction in efficiency. However, with the use of trays and passenger guidance through a dedicated APAC, a significant increase of 21% in the processing capacity of the modules can be seen, which reflects in gains in scale, considering all modules in the passenger security checkpoint.

b) Procedure of Resolution nº 207/2011 (ANAC, 2011) return to the WTMD after the first alarm:

Related to the non-application of item IV of art. 3rd, IV of Res. nº 207/2011 (ANAC, 2011), there was an approximate increase of 16% in the processing capacity of the security checkpoint modules. The repeal of this section does not create any type of AVSEC weakness, as the HHMD performs the same function as the WTMD, with the difference that the HHMD indicates the exact location of the object which caused the alarm and the WTMD indicates the position of where the largest quantity of metallic

mass is located. The analysis also found that frequent passengers have the habit of automatically returning to the WTMD when the alarm is triggered, a situation observed in the study for more than 50% of passengers. Another notable fact is the perception that using the HHMD is more uncomfortable for passengers, causing them inconvenience and delays in the screening process. These findings led to the recommendation to review this item in Resolution nº 207/2011.

c) Random and continuous manual search of hand luggage carried out by a specific APAC:

Regarding the random and continuous manual search of hand luggage carried out by a specific APAC, it was found that the procedure does not considerably impact the processing capacity of the passenger security checkpoint, denoting that such a configuration, in addition reducing the processing capacity of the module, did not bring any improvement in the application of the procedure. However, given the discrepancy found in passenger processing at Airports 1 and 2, it is suggested that the procedure be analyzed again.

d) Passenger x baggage processing time:

Regarding Analysis 7 and 8, it was demonstrated that the most impactful part of the screening process is related to the processing of hand luggage and not the passenger itself, it was observed that in a module configured with 1 WTMD, 2 x-rays and by 6 APAC the baggage processing time brings a real gain of 25% in passenger processing, without compromising AVSEC, in addition to reducing the number of equipment (1 HHMD and 1 WTMD) to be made available per module and require less physical space to install a checkpoint, therefore this is a possible layout solution to be adopted.

e) Random manual search of passengers and their luggage:

Regarding the manual search of those passengers who were selected for the manual search of hand luggage, it was found that the impact generated on processing efficiency is 8%, so that an 8% reduction in processing capacity was found, having the standard module as a basis. However, if the manual search were carried out in a private room, according to PNAVSEC - National Civil Aviation Security Programme (BRASIL, 2010), it is considered that the impact would be more significant, depending on the layout of the checkpoint and the distance from the security checkpoint module to the room.

As there was a considerable discrepancy between the results obtained at Airports 1 and 2, it is suggested that Analysis 5 be repeated at both airports.

f) Optimization of the Flow Controller for two security checkpoint modules:

The evaluation using only 1 flow controller for two security checkpoint modules reduced the processing capacity of the inspection module by 42%, based on the performance of a standard module, in addition to causing stress and a relative lack of control over APAC team. Therefore, the model is not suggested for application in international passenger security checkpoint, because of its specific requirements.

g) Employee security checkpoint:

In the evaluation carried out in the employee security checkpoint, it was found that the reduction of 1 APAC and 1 supervisor did not have any impact on the processing of people (queue or crowding). Regarding the effectiveness of access control and screening process, it cannot be concluded that the module configuration composed by 1 APAC x-ray operator and 1 APAC responsible for manual search is inferior to the standard configuration established in IAC 107-1004A RES (DAC, 2005). Therefore, further studies related to this item would be necessary.

It is also verified that the flow control agent has a fundamental role in verifying the airport authorization of an employee security checkpoint.

However, at times of lower flow of people, it is possible that the procedure can be adopted without impacting AVSEC. Another possibility for reducing the number of APACs is the adoption of an electronic authorization verification system, however these procedures would have to be better evaluated and with a larger sample.

h) Security checkpoint supervisors:

Despite the lack of definition, in legislation, of supervisors' duties, no vulnerability, reduction in module processing capacity or difficulty in coordinating teams with an increase in the number of security checkpoint modules per supervisor (from 2 to 3 modules) were perceived. Even so, it is suggested to carry out a mapping of

AVSEC activities that supervisors must carry out for a more realistic analysis of the number of modules they can supervise.

Finally, it is noteworthy that the legislation in force at the time of this study allowed little flexibility in the layout of the infrastructure and quantity of APAC in security checkpoints. Therefore, the procedures in the security checkpoint and the models that had good results in this study were considered in the regulations drawn up by ANAC, so that each airport administration can individually evaluate the configuration that best applies to their airports, considering the demand and operational specificity of each one and the current legislation.

Regarding the specificity of each scenario, it should be noted that the increase in efficiency allows for a gain in scale, as it affects all modules in the security checkpoint. Using the airports under study as a reference and comparing Analysis 3 and 2, the airport administration could reduce 1 security checkpoint module for every 5 modules installed, that is, a pre-screening advisor could reduce the labor force of 4 APAC, for every 5 modules installed.

Finally, it is worth noting that the savings in labor must be read with caution, since they are estimates, and there is no field study that considers the percentage of loss of security checkpoint capacity, which varies depending on its demand (passenger flow), due to the decrease in an APAC, not even a study that specifies the average increase in passenger inspection time in a random manual search compared to a common screening (passengers screened using metal detectors).

It is also worth emphasizing that the study did not aim to qualitatively evaluate the effectiveness of the procedures, this is a recommendation for the continuation and expansion of this pioneering study in the Brazilian reality.

5. REFERENCES

Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2011). Resolução ANAC nº 207, de 22 de novembro de 2011 - Procedimentos de inspeção de segurança da aviação civil contra atos de interferência ilícita nos aeroportos.

Askew, G. (2004). Who is the Screening Boss? - Does it Really Matter? Avsec World 2004, Conference Proceedings, Vancouver.

Brasil (2010). Decreto nº 7.168, de 5 de maio de 2010 – Dispõe sobre o Programa Nacional de Segurança da Aviação Civil contra Atos de Interferência Ilícia (PNAVSEC).

Departamento de Aviação Civil - DAC (2005). IAC 107-1004A RES – Controle de Acesso às áreas restritas de aeródromos civis brasileiros com operação de serviço de transporte aéreo.

Tamasi, G., & Demichela, M. (2011). Risk assessment techniques for civil aviation security. Reliability Engineering e System Safety, 96(8), 892–899. doi:10.1016/j.ress.2011.03.009

Turner, J. (2008) The Handbook of Project-Based Management: Leading Strategic Change in Organizations. McGraw-Hill Education.

Skorupski, J., & Uchroński, P. (2016). Managing the process of passenger security control at an airport using the fuzzy inference system. Expert Systems with Applications, 54, 284–293. doi:10.1016/j.eswa.2015.11.014

Yoo, K. E. (2009). A Study on Factors Influencing the Performance of Airport Security and on Responsibility Assignment of Security Task at International Airports. Journal of Aviation/Aerospace Education & Research. Volume 19 Number 1 JAAER Fall 2009.

Yoo, K. E., & Choi, Y. C. (2006). Analytic hierarchy process approach for identifying relative importance of factors to improve passenger security checks at airports. Journal of Air Transport Management, 12(3), 135–142. doi: 10.1016/j.jairtraman.2005.11.006.

MODELO PARA ANÁLISE DE PRÉ-VIABILIDADE DE AEROPORTO: O CASO DO AEROPORTO OSCAR LARANJEIRA - CARUARU/PE

Bárbara Mayane Alves Pereira*
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Viviane Falcão
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco
Coventry University

***Corresponding author e-mail address:** barbara.mayane@ufpe.br

PAPER ID: SIT2187

ABSTRACT

Airports are critical infrastructure for the transportation of passengers and cargo by air, designed to provide high-quality services and safety for all who use them. Regional airports are smaller airports that serve specific regions within a country or state. They typically have less passenger traffic and fewer facilities than large international airports but are essential for the economic development of the areas they serve. Oscar Laranjeira Airport (OACI: SNRU), located in Caruaru in the Pernambuco hinterland, is a small regional airport that primarily handles general aviation flights and air taxi services. Despite being considered a regional airport, its strategic location in the state of Pernambuco makes it important for the local economy, enabling easier and faster access to various regions of the state. The purpose of this work is to highlight the relevance of SNRU through the execution of a pre-feasibility study, including a projection of the airport's demand for the next 25 years. A demand forecasting model was developed for passengers, cargo, and aircraft based on data collected from ANAC (National Civil Aviation Agency). After this stage, an economic analysis was conducted based on projected costs and revenues. Subsequently, an economic analysis was performed using the Net Present Value (NPV) criterion. Other forms of analysis were not conducted because any investment related to CAPEX (Capital Expenditure) was disregarded. CAPEX investments would include infrastructure investments in the airport, such as expanding the passenger terminal, extending runways, and building a control tower, for example. Based on the results obtained, it can be concluded that SNRU has significant development potential and should be considered as an option for concession in the future.

Keywords: Estudo de pré-viabilidade, Transporte aéreo, Aeroportos regionais, Análise econométrica, Análise econômica.

1 INTRODUÇÃO

Oliveira e Salgado (2008) argumentam que o Transporte Aéreo Regional desempenha um papel crucial no desenvolvimento econômico de um país ou região, especialmente em países ou blocos continentais como o Brasil, onde a integração entre as regiões é essencial para garantir um desenvolvimento sustentável e justo.

A aviação regional no Brasil possui diversos papéis, incluindo a prestação de serviços em áreas remotas e de fronteira na Amazônia, o desenvolvimento de comunidades em todo o território nacional, a promoção de maior acesso ao transporte aéreo e o fomento da indústria do turismo. As dimensões continentais do território brasileiro, com mais de oito milhões de quilômetros quadrados e mais de cinco mil municípios, tornam a aviação regional um elemento de grande importância para a integração nacional.

Nos últimos anos, o mercado de aviação civil regional no Brasil tem apresentado um crescimento significativo, impulsionado principalmente pelo aumento da renda e da demanda por transporte aéreo em regiões remotas do país. Com mais 800 milhões km² de área total e mais de 5 mil municípios, torna-se necessária a ampliação do tráfego aéreo, viabilizando a conexão de cidades de menor porte aos grandes centros urbanos.

Caruaru é a maior cidade do Agreste, com grande avanço comercial e turístico, fazendo parte da "Rota da Moda", que é um conjunto de cidades que têm enfoque no comércio de roupas e artigos de moda, e promove muito lucro à cidade durante as festividades juninas no mês de junho. Consequentemente, é uma cidade que está propícia a geração de empregos e possui um custo de vida mais acessível comparada à capital, Recife. Porém, a falta de transporte aéreo na região dificulta a mobilidade e o crescimento na região. O aeroporto mais próximo à cidade é o de Recife, a uma distância de mais de 130km. A única estrada que liga as duas cidades, Caruaru e Recife, é a BR 232, que hoje já está congestionada e não consegue suportar a quantidade de veículos que trafegam nela. Inserindo o transporte aéreo como opção para se deslocar de uma cidade à outra diminuiria esse congestionamento e traria menos transtornos às pessoas.

Para efeitos de comparação, a empresa espanhola Aena Internacional recebeu a concessão do Aeroporto de Campina Grande - Presidente João Suassuna juntamente com outros cinco aeroportos que formam o Bloco Nordeste durante a quinta fase de privatizações. Esses aeroportos incluem Recife, João Pessoa, Maceió, Aracaju e Juazeiro do Norte. Embora Campina Grande tenha uma área menor do que Caruaru, a cidade tem uma população muito semelhante e abriga um aeroporto que é capaz de receber aeronaves maiores, o que tem um impacto significativo na economia regional.

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma avaliação econômica do aeroporto de Caruaru, com o intuito de sugerir um modelo de negócios.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Avaliar a economia da região;
- Verificar os custos de um aeroporto regional de mesmo porte;
- Pesquisar a demanda aeroportuária do mesmo;
- Implantar metodologias que possam eclodir o desenvolvimento do aeroporto para um de maior porte;

2 PANORAMA GERAL SOBRE AEROPORTOS

2.1 Aeroportos regionais

Os aeroportos regionais são terminais aéreos que servem para atender a demanda de transporte aéreo em regiões de menor porte, atuando como complemento ou alternativa aos aeroportos principais das grandes cidades. Geralmente, esses aeroportos atendem voos de companhias aéreas de menor porte, voos executivos ou de aviação geral. Eles podem ser importantes para o desenvolvimento econômico de uma região, pois permitem a conexão com outras cidades e regiões, facilitando o transporte de pessoas e bens (Torres e Portugal, 2013).

No Brasil, a Lei 13.097 de 2015 definiu aeroporto regional como aeroportos de pequeno ou médio porte, com movimentação anual de passageiros (embarcados e desembarcados) inferior a 600.000 passageiros. Para a região da Amazônia Legal, o limite é de 800.000 passageiros por ano. A mesma lei também definiu que fazem parte de rotas regionais os voos que tenham como origem ou destino um aeroporto regional.

Contudo, nota-se que na literatura a concepção de Aeroportos regionais varia sob certos aspectos, como a movimentação anual de carga e passageiro, sua localização geográfica, estando localizados fora de regiões metropolitanas das capitais e que atendem municípios do interior do estado, ou o seu tamanho e porte.

2.2 Custos aeroportuários

Os custos aeroportuários referem-se aos gastos associados à operação de um aeroporto, que incluem uma ampla variedade de serviços, tais como o uso da pista, o acesso aos portões de embarque, a manutenção da infraestrutura e equipamentos, serviços de segurança, além de despesas administrativas e de pessoal. Esses custos são geralmente cobertos pelas receitas geradas pelas companhias aéreas, passageiros e outras fontes, como lojas e restaurantes dentro do aeroporto.

Os custos aeroportuários vão de acordo com a operabilidade do aeroporto, sendo assim, são divididos em dois grandes grupos, os custos operacionais e os não operacionais.

Os custos operacionais são aqueles que estão atrelados às atividades cotidianas do aeroporto, podendo se comprometer caso estas atividades sejam interrompidas. Já as atividades não operacionais são independentes de qualquer atividade aeroportuária, como os juros de operação de capital e a depreciação dos ativos fixos, como pista e prédios (Silva, 1991).

2.3 Receitas aeroportuárias

As receitas aeroportuárias remuneram a utilização dos serviços e espaços pela aeronave e passageiros. Assim como os custos, as receitas também se dividem em operacionais e não operacionais, sendo as receitas operacionais mais ampla.

As receitas operacionais são geradas em virtude da operação do aeroporto, isto é, do movimento de aeronaves, passageiros, carga aérea e mala postal, bem como das atividades decorrentes desta movimentação, como os serviços prestados às aeronaves, passageiros e acompanhantes (Lopes, 2014).

Já as receitas não operacionais são aquelas que não estão associadas diretamente à operação do aeroporto. Estas receitas possivelmente continuarão a existir mesmo que o aeroporto fique fora de operação.

As taxas aeroportuárias são estabelecidas pela lei fiscal do Estado em razão de certas atividades que exigem serviço e despensas ou investimentos públicos, como alfândega, imigração, compras de combustíveis, acesso ao aeroporto, etc (Silva, 1991).

O Decreto Nº 89.121, de 06 de dezembro de 1983, dispõe sobre a utilização e a exploração dos aeroportos e das facilidades à navegação aérea.

2.4 Concessões aeroportuárias

As concessões aeroportuárias foram iniciadas em muitos países como uma forma de melhorar a infraestrutura aeroportuária e expandir a capacidade de atendimento às crescentes demandas dos viajantes.

No Brasil, as concessões aeroportuárias começaram em 2011, com o objetivo de modernizar e ampliar a infraestrutura aeroportuária do país, bem como melhorar a qualidade dos serviços prestados aos passageiros. Além disso, o programa de concessões aeroportuárias visou atrair investimentos privados para o setor, com o objetivo de reduzir a dependência do governo e aumentar a eficiência operacional dos aeroportos (FALCÃO, 2022).

A primeira concessão federal de aeroportos ocorreu em 2011, com o Aeroporto de São Gonçalo do Amarante, localizado em Natal (RN). Essa ação foi considerada um piloto, cujo objetivo era testar o modelo antes de expandi-lo (FALCÃO, 2022).

O Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) foi criado, no âmbito da Presidência da República, pela Lei nº 13.334, de 2016 com a finalidade de ampliar e fortalecer a interação entre o Estado e a iniciativa privada por meio da celebração de contratos de parceria e de outras medidas de desestatização (GOV.BR).

Em 2017, realizou-se a primeira licitação no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI), com o objetivo de incentivar o investimento privado em infraestrutura e serviços públicos. Desde então, o programa de concessões aeroportuárias tem atraído investimentos significativos de empresas nacionais e estrangeiras, ajudando a modernizar e expandir a infraestrutura aeroportuária do país.

3 METODOLOGIA

I. *Revisão de Literatura:* Esta etapa abrange consulta à literatura especializada bem como de coleta de informações e dados, em meio eletrônico e outras fontes que se mostraram plausíveis durante a realização do estudo, tais como entidades representativas do setor de transportes. As pesquisas realizadas buscaram meios de aprofundar o assunto sobre aeroportos regionais, tanto nacionais quanto internacionais, avaliação socioeconômica da cidade de Caruaru e região, movimentação de passageiros e cargas, conceitos utilizados na aviação civil, a crescente demanda do transporte aéreo no Brasil, técnicas para previsão de demanda e, por fim, detalhes sobre o software que será utilizado, o *GRETL*.

I. *Recolhimento de dados:* Foram levantados dados socioeconômicos e operacionais, advindos da ANAC (movimentação de passageiros, bagagens, cargas, aeronaves, tarifas e *yield*) e IPEA DADOS (PIB). Os custos aeroportuários foram coletados diretamente com a empresa administradora do aeroporto, a DIX aeroportos.

II. *Modelo de demanda:* Para a obtenção do modelo de demanda do aeroporto os dados foram compilados no software Gretl. Inicialmente foram obtidos os dados estatísticos das amostras, sendo eles: média, mediana, desvio padrão, mínimos e máximos. Em seguida, foram desenvolvidos os modelos de demanda para passageiros, cargas e aeronaves, fazendo uma regressão linear, utilizando o método dos Mínimos Quadrados Ordinários Por fim, foi feito um modelo de previsão de demanda para 25 anos futuros, ou seja, a partir do ano de 2024 até o ano de 2049.

III. *Função custo:* Com base no mesmo princípio do modelo de demanda, foram consolidados os dados no software *Gretl*, submetendo-os a uma análise por número de passageiros, cargas e aeronaves. A função custo foi feita a partir do custo unitário de cada passageiro do primeiro semestre de 2022. Não foram avaliados todos os meses devido a inconsistência dos dados. Finalmente, é feita a análise de projeção de custos nos próximos 25 anos (2024 até 2049).

IV. *Análise econômica:* Foram feitos os levantamentos das receitas totais, obtidas através do produto entre a demanda prevista (seja ela de passageiros, carga ou aeronaves) e a tarifa prevista para cada ano do intervalo de tempo analisado. Foram definidas as tarifas para passageiros, carga e aeronaves. Por fim, foram feitos o fluxo de caixa, balanço entre a receita e o custo, e a análise de viabilidade do aeroporto, de acordo com Valor Presente Líquido.

4 ESTUDO DE CASO

Em 25 de janeiro de 1944 foram iniciadas as atividades do Aeroclube de Caruaru. O aeródromo recebia voos particulares e, também, oferecia curso de pilotagem. Do final do século 20 até meados dos anos 2000 o aeroporto passou por várias reformas. Porém, só em novembro de 2020, a ANAC liberou voos comerciais no aeroporto. A companhia Azul Linhas Aéreas é o responsável por ofertar voos diretos para Recife. São liberados 9 assentos por voo, tanto para ida quanto para volta, percorrendo uma distância de 121 km. Abaixo estão os dados do SNRU.

- *Nome oficial:* Aeroporto Oscar Laranjeira;
- *Endereço:* Rua Oscar Laranjeira, 4000 – Bairro Kennedy – Caruaru/PE, CEP: 55024-120;
- *Código ICAO:* SNRU;
- *Código IATA:* CAU;
- *Geoposicionamento:* 08°16'56,60" S / 036°00'48,75" W;
- *Elevação:* 576 metros.

Figura 1 Aeroporto Oscar Laranjeira – Caruaru/PE (ICAO: SNRU)

4.1 Apresentação dos dados do SNRU

Para iniciar as análises econométricas foram recolhidos no sistema de dados da ANAC os dados referentes ao SNRU, que disponibiliza todos os microdados de qualquer aeroporto ou aeródromo do Brasil, e no IPEA DADOS. Todos as séries foram escolhidas no período de novembro de 2020, quando se iniciaram as operações da Azul Linhas Aéreas em Caruaru, até dezembro de 2022. O conjunto desses dados para cada mês é considerado uma amostra. Sendo assim, foram obtidos no final 26 amostras para o estudo em questão.

I. *Movimentação de passageiro:* Foram dados fornecidos pela ANAC. A série fornece medições mensais entre novembro de 2020 até dezembro de 2022. Esses números serão correlacionados com outros fatores para que seja formada a demanda de passageiros.
II. *Número de aeronaves:* Foram recolhidos do banco de dados da ANAC. Para este caso, foram recolhidas apenas as aeronaves comerciais, fornecidas pela Azul Linhas Aéreas.
III. *Movimentação de carga:* Foram recolhidos a partir do banco de dados da ANAC, em quilogramas. Esses números serão correlacionados com variáveis independentes para a modelagem da demanda de carga.
IV. *Yield real médio:* É o valor médio pago por passageiro para cada quilometro voado. Esses dados são fornecidos mensalmente pela ANAC por meio da ferramenta *Microsoft Power Business Intelligence*, conhecida como *Power BI*. São valores deflacionados pelo índice de preço ao consumidor amplo – IPCA. São independes das companhias aéreas.
V. *Produto Interno Bruto:* É fornecido pelo Banco Central do Brasil, porém foi retirado no site do IPEA DADOS. Neste caso seria preferível a utilização dos dados do município de Caruaru ou Pernambuco, porém estes dados não são disponíveis em uma periodicidade mensal. Por isso foi escolhido o PIB mensal do Brasil.

4.2 Modelo de demanda

Para o estudo da projeção de demanda fez-se utilidade do *software Gretl* (2023), para ser feita uma regressão linear pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), uma vez que este é capaz de estimar os coeficientes utilizados na projeção das variáveis independentes definidas.

Com o intuito de estabelecer a relação entre as variáveis, foram realizadas análises estatísticas utilizando as estimativas de teste *p-valor* e *razão-t*. O p-valor foi adotado como critério para determinar o nível de significância do teste e é considerado mais significativo quando menor que 0,10. Caso o seu valor seja maior, as regressões seriam descartadas previamente, resultando em uma redução no número de testes a serem avaliados. Por outro lado, a razão-t é um teste de hipótese que utiliza conceitos estatísticos para verificar a rejeição ou não da hipótese nula. Nesse sentido, os parâmetros são considerados mais significativos quando a razão-t apresenta valores superiores a 1,96 em módulo.

Já o R^2 (coeficiente de determinação) é uma medida estatística utilizada para avaliar a qualidade do ajuste de um modelo de regressão aos dados observados. Em outras palavras, o R^2 mede a porcentagem da variação na variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo. O R^2 varia de 0 a 1, sendo que valores próximos a 1 indicam um bom ajuste do modelo aos dados, enquanto valores próximos a 0 indicam que o modelo não é capaz de explicar a variação dos dados. Entretanto, é importante lembrar que o R^2 isoladamente não indica se o modelo de regressão é adequado ou não para fazer previsões

ou conclusões, sendo necessário realizar outras análises para isso.

Para os modelos com mais de uma variável independente, é necessário verificar se há multicolinearidade entre elas. O método utilizado para esta verificação é o Fator De Inflação Da Variância (VIF), que avalia o quanto a variância de um coeficiente de regressão estimado aumenta se as suas preditoras estiverem correlacionadas.

Para a demanda dos passageiros, foi definida como variável independente o *Yield* real mensal. Sendo assim, a modelagem para a situação de passageiros domésticos pode ser observada na equação, representada abaixo. Se os fatores forem menores que 5, indica que não há colinearidade significativa entre eles.

$$Pax = A + B * YIELD_R \quad (1)$$

$$Pax = 607{,}913 - 836{,}601 * YIELD_R \quad (2)$$

O coeficiente de determinação R^2 indicou que apenas 24,06% da variabilidade do número de passageiros pode ser explicada pela relação linear com a variável *Yield* Real, o que sugere que outros fatores podem estar influenciando essa relação. O coeficiente de regressão encontrado foi negativo, o que significa que um aumento no valor da variável *Yield* Real está associado a uma redução no número de passageiros. Além disso, o valor da razão t (-2,757) foi maior do que 1,96 (valor crítico para um nível de significância de 5%), indicando que o coeficiente de regressão para a variável independente *Yield* Real é estatisticamente significativo. O p-valor encontrado foi igual a 0,0110, o que sugere que o coeficiente de regressão é significativo a um nível de significância de 5%. No entanto, vale destacar que a quantidade de dados utilizados para esta análise foi pequena, o que pode ter afetado o valor do coeficiente de determinação e limitado a capacidade do modelo em explicar a relação entre as variáveis de forma mais abrangente.

No modelo de demanda de carga, as variáveis independentes atribuídas foram o número de passageiros e o PIB mensais. Foi elabora o seguinte modelo para a demanda de carga:

$$Carga = A + B*PAX + C*PIB \quad (3)$$

$$Carga = -6185{,}11 + 11{,}023 * PAX + 0{,}008 * PIB \quad (4)$$

O coeficiente de determinação R^2 indicou que cerca de 76% da variabilidade da quantidade de carga pode ser explicada pela relação linear com essas variáveis independentes. Os coeficientes de regressão também foram positivos, indicando que um aumento no número de passageiros e no PIB está associado a um aumento na quantidade de carga transportada.

A razão-t para o número de passageiros foi de 7,043 e para o PIB foi de 2,148, ambos maiores do que 1,96 (valor crítico para um nível de significância de 5%), o que sugere que esses coeficientes são estatisticamente significativos e não ocorreram por acaso. O valor do p-valor foi igual a 3,55 e-07 para o número de passageiros e 0,0425 para o PIB, indicando que o coeficiente de regressão para o número de passageiros é altamente significativo, enquanto o coeficiente de regressão para o PIB é significativo a um nível de 5% de significância.

O valor obtido no teste VIF foi igual a 2,401, menor que 5, indicando que há uma baixa multicolinearidade entre essas variáveis.

Por fim, as variáveis independentes escolhidas para a demanda de aeronaves foram o número de passageiros e a carga.

$$Aero = A + B * PAX + C * CARGA \quad (5)$$

$$Aero = 21{,}744 + 0{,}095 * PAX + 0{,}005 * CARGA \quad (6)$$

A regressão linear realizada para estimar a quantidade de aeronaves a partir do número de passageiros e da carga como variáveis independentes apresentou um coeficiente de determinação R^2 de 0,80359, o que indica que 80,36% da variabilidade da quantidade de aeronaves pode ser explicada pela relação linear com o número de passageiros e a carga. Além disso, os coeficientes de regressão encontrados foram positivos, o que significa que há uma relação positiva entre cada variável independente e a quantidade de aeronaves. A razão-t para o número de passageiros foi de 3,606 e para a carga foi de 1,733, ambos maiores do que 1,96 (valor crítico para um nível de significância de 5%), o que sugere que esses coeficientes são estatisticamente significativos.

O teste VIF entre as variáveis independentes passageiros e carga foi 3,539, o

que sugere uma moderada multicolinearidade entre elas. Isso significa que essas variáveis podem estar correlacionadas entre si.

4.3 Projeção para os próximos 25 anos

Antes de fazer a projeção, foi necessário estimar as variáveis independentes das equações de demanda, como o PIB e o *Yield*.

Um estudo realizado pelo IPEA em 2023 projetou que o PIB brasileiro terá um crescimento de 1,4% em 2023 e 2,0% em 2024. Foram recolhidas as taxas do PIB dos anos de 2020, 2021 e 2022, sendo -3,9%, +5% e +2,9%, respectivamente. No ano de 2020 o PIB teve uma queda devido ao colapso da pandemia do Covid 19, prejudicando não somente o Brasil, mas o mundo inteiro. Feito uma média dessas cinco taxas, foi obtido um crescimento médio de 1,48% ao ano. Portanto, esta taxa foi atribuída para prever o PIB nos próximos 25 anos.

Quanto ao *Yield*, a projeção considerou um aumento no porte das aeronaves, o que levará a uma diminuição de 2% ao ano no valor do *Yield*.

Com as previsões do PIB e do *Yield*, foi possível aplicá-las nas equações de demanda, obtendo a média do número de passageiros, cargas e aeronaves para cada ano. *Como* a análise é mensal, fez-se necessária a multiplicação dos valores obtidos por 12, para encontrar a média anual.

4.4 Custos

A modelagem da função custo apropriada e a análise dos custos associados aos serviços da infraestrutura selecionada foram realizadas com base nos dados fornecidos pela DIX Aeroportos, empresa responsável pela administração e operação do aeroporto de Caruaru. Vale destacar que os dados disponíveis se limitaram aos meses do ano de 2022.

Os dados correspondentes aos custos, disponibilizados pela Dix Aeroportos, foi uma projeção para o ano de 2022, feitos no início deste mesmo ano. Nessa projeção estão envolvidos os custos com as equipes de níveis superior, médio e administrativo, cursos e treinamentos e manutenções em geral no aeroporto.

Para obtenção da equação dos custos em anos futuros com base na projeção do número de passageiros, foi calculado o custo unitário médio. Para obter esse resultado, foi feito o custo unitário para cada respectivo mês, a partir da razão entre os custos totais e quantidade de passageiro. Por fim, foi feita a média entre eles e obteve-se o resultado esperado. Contudo, no ano de 2022 o número de viagens diminuiu no segundo semestre, consequentemente o número de passageiros. Por este motivo, os custos unitários na segunda metade do ano foram muito altos, não sendo usuais para serem considerados no cálculo do custo unitário médio.

Com a equação do custo unitário definida, foram compilados os custos anuais dos próximos 25 anos utilizando a demanda de passageiros mensais. Inicialmente foram encontrados os custos médios mensais de cada ano, utilizando-se a equação 7, e com os valores obtidos realizou-se a multiplicação por um período de 12 meses, o que acarretou no valor total dos custos anuais.

$$Custo_{mensal} = 229{,}35 * PAX_{mês} \qquad (7)$$

4.5 Receitas

Para o cálculo das receitas, foram utilizadas as tarifas aeroportuárias para cada categoria, de acordo com a Portaria número 8.479, elaborado pela ANAC que passou por alterações no ano de 2022. Segue abaixo a tabela.

Tabela 1 Tarifas aeroportuárias (ANAC, 2022)

Tarifa	*Valor*
Tarifa Embarque do Grupo I Doméstico	R$ 40,26
Tarifa de Pouso do Grupo I	12,6071 R$/ton
Capatazia	0,2064 R$/kg

A tarifa de embarque é multiplicada pela quantidade de passageiros projetada em cada ano, obtendo a receita total por passageiros naquele ano.

Para a receita das aeronaves foi utilizado como modelo o *Airbus A320neo*, que possui capacidade para 165 passageiros em uma configuração comum de duas classes. Este tipo de aeronave decola com capacidade máxima de 79 toneladas. Foi a partir desta estimativa que foram calculadas as tarifas das aeronaves para as projeções futuras, ou seja, a tarifa de pouso foi multiplicada por 79 para cada voo, e então multiplicada pela quantidade de voos, obtendo a receita final de aeronaves para cada ano.

Por fim, a tarifa de capatazia é multiplicada pela quantidade obtida nas projeções de carga de cada ano, para ser obtida a receita total de carga.

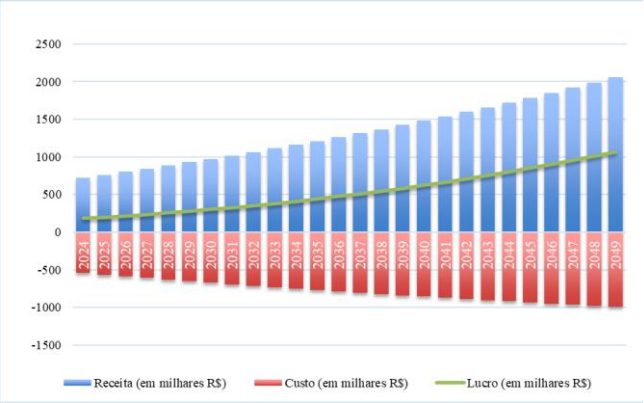


Figura 2 Fluxo de Caixa

4.6 Análise de viabilidade

Para a verificação se o estudo em questão foi economicamente viável, utilizou-se a análise econômica do Valor Presente Líquido, que visa calcular o valor presente de um fluxo de caixa futuro, considerando uma taxa de desconto. Em outras palavras, o VPL é o resultado da diferença entre o valor presente das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa de um projeto. A taxa de desconto será igual a Taxa Mínima De Atratividade, atribuída de 8% a.a.

$$VPL = \sum_{t=1}^{25} \frac{B_t - C_t}{(1+0{,}08)^{25}} \qquad (8)$$

VPL = R$ R$ 4.361.107,91

5 RESULTADOS

Após feito o fluxo de caixa e traçado a linha de lucro do SNRU, fica fácil visualizar que o aeroporto apresenta um aumento do lucro ao longo do tempo. Nota-se também, que no ano de 2038 o número de passageiros anuais será mais que o dobro da quantidade no ano de 2022. Em 2038 o quantitativo previsto é de 3.574, enquanto em 2022 foi de 1765 passageiros. Em relação a quantidade de carga, no ano de 2030 o valor obtido seria mais que o dobro da quantidade em 2022.

Com essa movimentação de cargas e passageiros, o número de aeronaves irá aumentar consequentemente, gerando bastante receita para o aeroporto, visto que suas tarifas são mais elevadas. No ano de 2034 o faturamento aproxima da marca de 1 milhão de reais.

Com o VPL positivo, constata-se que o projeto em questão é viável financeiramente e que o investimento inicial poderá ser recuperado com o tempo. O valor encontrado indica que, considerando uma taxa de desconto de 8%, o valor presente das entradas de caixa do projeto é maior do que o valor presente das saídas de caixa. Em outras palavras, o projeto deverá gerar um retorno financeiro positivo ao longo do tempo, o que é um bom sinal para investidores ou gestores que buscam analisar a viabilidade econômica do aeroporto.

6 CONCLUSÃO

O modelo elaborado pode confirmar o potencial de desenvolvimento do Aeroporto Oscar Laranjeira, alcançando o dobro de passageiros e cargas transportados em menos de 25 anos. No ano de 2031 o faturamento ultrapassa a marca de 1 milhão de reais. Ao final do período de 25 anos estimado, o lucro total do aeroporto passa de 1 milhão de reais, valor este nunca alcançado até então.

A fim de avaliar economicamente o estudo de pré-viabilidade, foi empregada a fórmula econômico-financeira do Valor Presente Líquido (VPL), com o intuito de determinar se o estudo em questão foi bem-sucedido. Com o VPL positivo, constata-se que o projeto em questão é viável financeiramente e que o investimento inicial poderá ser recuperado com o tempo.

Os outros meios de analise não foram realizados pois foi desconsiderado qualquer investimento relativo ao CAPEX (*Capital Expenditure* - Despesas de Capitais, em português), que seriam investimentos para a infraestrutura do aeroporto, como aumento de terminal de passageiros, aumento das pistas e torre de controle, por exemplo. Sendo incluído esses investimentos, os custos aumentariam consequentemente, mudando consideravelmente os resultados apresentados.

De acordo com as informações coletadas e nas análises realizadas, o estudo de viabilidade pôde fornecer informações importantes para que os investidores, gestores públicos e demais envolvidos possam tomar decisões informadas sobre a construção ou expansão do aeroporto.

Isso pode incluir a definição do tamanho e escopo do empreendimento, a definição do modelo de financiamento e a elaboração de planos de negócios e operação. Um meio importante para que tal investimento seja aplicado, é por meio das concessões aeroportuárias, que impulsionam o crescimento do aeroporto.

Com a ampliação e modernização do aeroporto, a cidade de Caruaru irá adquirir um novo motor econômico, criando empregos e atraindo investimentos, facilitando o transporte de cargas e aumentando o fluxo de pessoas.

7 REFERÊNCIAS

ANAC. (2022, Jul 13). *Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil.* Resolução nº 686 Emenda nº 11.

ANAC. (2011). *Agência Nacional de Aviação Civil. Regulamento Brasileiro Da Aviação Civil.* Resolução nº 156 Emenda nº 00.

Bettini, H. (2010). *Um retrato da aviação regional no Brasil. Journal of Transport Literature,* 1(1).

Bettini, H. F. D. A. J., & Oliveira, A. V. (2011). *JTL| RELIT. Journal of Transport Literature,* 5(4), 171-187.

Da Silva, A. (1991). *Aeroportos e desenvolvimento* (Vol. 4). INCAER.

Falcão, V. A. (2013). *Demanda aeroportuária de Manaus e sua influência para o setor de turismo da região*. *Journal of Transport Literature,* 7, 127-146.

Instituto De Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). *Ipea mantém previsão de crescimento do PIB para 2023 em 1,4%*. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/13650-ipea-mantem-previsao-de-crescimento-do-pib-para-2023-em-1-4.

Jenichen, E. A. (2002). Receitas e Despesas em Aeroportos: Uma abordagem econométrica. 01 de outubro de 2002. Dissertação (Mestrado em Transporte Aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2002.

Lopes, D. R. (2014). *Receitas comerciais em aeroportos de pequeno porte: análise*. In Anais do XIII SITRAER–Air Transportation Symposium. São Paulo, de (Vol. 17).

Oliveira, A. V., & Salgado, L. H. (2008). *Constituição do marco regulatório para o mercado brasileiro de aviação regional.* NECTAR/ABETAR. São José dos Campos.

Pereira, A. P. C. (2016). *Quem são? Para onde vão?: o segmento aéreo regional no Brasil. Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia,* (29).

Sehn, D. (2009). *Avaliação econômica de projetos de infraestrutura de transportes: Uma metodologia aplicada à tomada de decisão governamental*.

Torres, R. D. R., & Portugal, L. S. (2013). Caracterização de aeroportos regionais: contribuição para uma classificação brasileira. In XXVII Congresso Anual da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes.

OBTENÇÃO DA ORIENTAÇÃO DE PISTA DE POUSO E DECOLAGEM POR MODELAGEM DE ANEMOGRAMA EM LINGUAGEM PYTHON

Antônio Carlos Hanig
John Heberty de Freitas
Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira*
João Paulo Silva Lima
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Curso de Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: *michelle.galvao@ufg.br

PAPER ID: SIT2327

ABSTRACT

This paper seeks to present a methodology that can contribute to the effectiveness of the operation of new airport projects, focusing on the analysis and studies of winds on the runway and airport takeoff. A methodological proposal is presented, which consists of collecting wind data in existing airports, which historically have a high crosswind index, in order to present non-conformities in the standard models applied and/ or estimated a priori. To validate the study, three Brazilian airports are evaluated: Guarulhos International Airport - São Paulo/SP, Guararapes International Airport - Recife/PE and Barreiras/Bahia Regional Airport. Through the modeling of Anemogram using the Python language, it is possible to analyze the orientation of runway landing and takeoff. We used the analysis of four probability distribution curves for the winds at the proposed sites, the distribution GEV - Generalized Extreme Value Distribution, Log-normal, Weibull and Gumbel, to identify which or which would be the best choice of probability distribution that can more assertively describe the behavior of the winds in that place, and serve to assist in predicting future undesirable events in landing and takeoff operations, Seeking to improve operational and safety in air transport. The results show that the Weibull distribution is the one that best fits the wind data at Guarulhos Airport. The Lognormal distribution is the most suitable for wind data at Recife Airport; and the Gumbel distribution is the one that best fits the wind data at Barreiras Airport. These results are important because they allow more accurate wind forecasts to be made at each airport, which can help improve the operability and safety of aeronautical operations. In addition, choosing the correct probability distribution can help prevent future undesirable events such as aviation accidents and incidents. However, it is important to emphasize that the choice of the correct probability distribution depends on the particularities of each location and the data collected. Therefore, it is necessary to perform a careful analysis of wind data at each airport before choosing the most appropriate probability distribution.

Keywords: Airport, Wind, Anemogram, Runway Orientation, Python.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor e a terceira autora agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq por meio do processo no 168071/2022-3 na modalidade Iniciação Tecnológica – ITC-A para o desenvolvimento deste trabalho, referente ao projeto de desenvolvimento tecnológico "PI06353-2022 – *Desenvolvimento de modelo de acidente em operações de pouso e decolagem de aeronaves comerciais*" da Universidade Federal de Goiás - UFG-FCT.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais definições de aeroporto é: “um aeroporto é um complexo sistema de facilidades, e geralmente o empreendimento mais importante da região. É um gerador econômico e catalisador de captação de investimentos em sua área de atuação” (KAZDA; CAVES, 2007). No entanto, essa definição só faz sentido com uma pista bem dimensionada e adequada à aeronave de projeto (PAMPLONA; ALVES, 2013).

Os efeitos adversos do vento cruzado são minimizados com o pouso e a decolagem sempre na direção contrária do vento. Assim a orientação da pista depende da componente de velocidade do vento, da frequência e da direção (ASHFORD et al. 2011). Uma das principais motivações deste estudo rege em torno da segurança das operações de pouso e decolagem de voos em aeródromos.

O estudo dos ventos para a aviação é essencial, pois garante a segurança das operações de pouso e decolagens, que são operações que correspondem por cerca de 40% dos índices de acidentes aeronáuticos. Logo, estudar a posição e a velocidade dos ventos no sítio aeroportuário faz-se imprescindível, além da recomendação de operacionalidade de 95% que um aeroporto deve atingir em um ano. Isto, bem definido, torna o aeroporto operacional e comercialmente atrativo.

Diante dessa problemática, este artigo visa apresentar uma proposta metodológica que garanta a eficácia da operacionalidade de novos projetos aeroportuários. Assim, como objetivo geral, este trabalho almeja obter a orientação de pista de pouso e decolagem de aeroportos brasileiros, de forma com maior precisão, de forma que seja possível avaliar as condições de segurança operacionais de pouso e decolagem dos aeródromos existentes. Para tanto, serão selecionados três importantes aeroportos para uma análise e estudos de ventos.

Para validar o estudo, serão avaliados aeroportos existentes com alto índice de ventos cruzados, a fim de apresentar não conformidades nos modelos padrões aplicados e/ou estimados, comparando dois cenários: a orientação atual; e a orientação desenvolvida por modelo gerado após análise de dados coletados com o INMET - Instituto Nacional de Meteorologia e dados dispostos no site Windfinder.

2. PROJETO GEOMÉTRICO DE UM AERÓDROMO

O Projeto Geométrico de um aeródromo reúne as informações mais importantes de um projeto aeroportuário, as quais servem de base para a elaboração de todos os demais projetos de infraestrutura, devendo conter os elementos fundamentais alinhados com a regulamentação em vigor (SAC/MINFRA-ITA, 2021).

Dentre os elementos geométricos que configuram um aeroporto estão os Dados de Vento (Anemograma), que devem ficar destacados em um Memorial Descritivo.

Conforme o Manual de Projetos Aeroportuários (SAC/MINFRA-ITA, 2021) o Anemograma apresenta-se na forma de um gráfico de intensidade, direção e duração dos ventos que servirá para avaliar a direção da Pista de Pouso e Decolagem - PPD, com base em dados disponíveis no sítio do Instituto Nacional de Meteorologia de estações meteorológicas da região do local da obra.

A orientação da pista é um dos pontos chave dos projetistas de infraestruturas aeroportuárias. Provavelmente o mais antigo, o mais básico e a característica fundamental de um aeroporto são a sua configuração e orientação de pista (WELLS, 1992).

Orientação é o ângulo que a linha central faz com o azimute. Este é um dos problemas presentes desde os primórdios da aviação, quando as aeronaves pousavam em pistas de terra e de grama (conhecida como a fase da infância da aviação), com pilotos guiados pela direção do vento, indicados pelo instrumento biruta (PAMPLONA; ALVES, 2013). Instrumento que indica a direção e velocidade do vento, orientando pilotos, controladores de tráfego aéreo e outros profissionais do aeródromo (BANDEIRA, 2023).

Por declinação magnética entende-se que é o ângulo formado entre o meridiano verdadeiro e o meridiano magnético; ou também pode ser identificado como desvio entre o azimute ou rumo verdadeiros e os correspondentes magnéticos (PASTANA, 2017).

Entende-se por Azimute o ângulo horizontal formado entre a direção Norte/Sul e o alinhamento em questão (neste estudo, seria o eixo da PPD). É medido a partir do Norte, no sentido horário (à direita), podendo variar de 0º a 360º.

A declinação magnética varia com o tempo e com a posição geográfica, podendo ser ocidental (δW), negativa quando o polo magnético estiver a oeste (W) do geográfico e oriental (δE) em caso contrário (PASTANA, 2017).

A Figura 1 mostra graficamente a transformação de elementos (rumos e azimutes) com orientação pelo Norte Verdadeiro (NV) ou Magnético (NM) é um processo simples, basta somar algebricamente a declinação magnética (na Figura 1 simbolizado pela letra D).

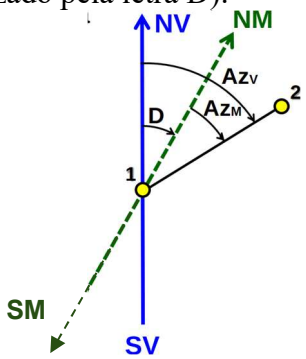


Figura 1 Transformação de Norte Magnético em Geográfico e vice-versa. Fonte: Pastana (2017).

Quando conhecemos os azimutes dos alinhamentos, podemos facilmente, a partir deles, determinar os rumos correspondentes, através de simples relações geométricas, bastando para isso observar que: a partir do Norte, os rumos crescem no sentido horário para E, e no anti-horário para W; e a partir do Sul crescem no sentido anti-horário para E, e horário para W (Figura 2).

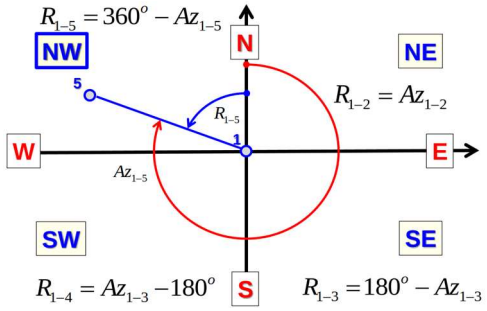


Figura 2 Rumos e Azimutes em cada quadrante. Fonte: Pastana (2017).

Por convenção, a contagem dos rumos tem como origem o ponto Norte (N) ou o ponto Sul (S) e a sua variação é de 0º a 90º. Portanto, o rumo não possui valor negativo, porém, é obrigatória a designação do quadrante a que pertence o ângulo azimutal no sistema polar.

A Equação 1 mostra o cálculo do rumo magnético (RM) de pista a partir do rumo verdadeiro (RV) do vento (DEL FIANCO et al., 2017). O RV é determinado a partir do estudo estatístico dos dados da direção do vento, obtidos para aquela região ao longo do tempo, através de um Anemograma, gráfico que é construído no sistema polar, representando fenômenos direcionais.

$$RM = RV - [\delta ø + V \times (T - Tø)] \quad \text{(Eq. 1)}$$

Em que:

- RM: rumo magnético (graus);
- RV: rumo verdadeiro (graus);
- δø: declinação magnética do ano inicial;
- V: variação anual da declinação magnética;
- T: ano em questão (atual); e
- Tø: ano com dado conhecido.

Para o caso do Brasil, para os locais onde a declinação magnética for negativa, o Rumo Magnético situa-se a oeste do Rumo Verdadeiro (Equação 2). Assim, desprezando a variação anual e a diferença entre anos, temos que o RM (graus) é obtido como na Equação 3:

$$RM = RV - (-\delta) \quad \text{(Eq. 2)}$$
$$RM = RV + \delta \quad \text{(Eq. 3)}$$

De acordo com o RBAC 154 EMD 07 (ANAC, 2021), muitos fatores afetam a determinação da orientação, localização e o número de pistas de pouso e decolagem. Um dos mais importantes é o *fator de utilidade*, determinado pela distribuição do vento. Ainda segundo o RBAC 154 - Apêndice G, existem fatores que devem ser mais frequentemente estudados, divididos em 4 grupos:

i) Tipo de operação: IFR ou VFR 24h ou somente diurno;

ii) Condições climatológicas - estudo da distribuição de ventos para determinar o fator de utilização e componentes máximos de ventos médios de través;

iii) Topografia do aeródromo e entorno;

iv) Tráfego aéreo do entorno do aeródromo.

Este estudo tem como foco o fator de utilização e o fator *ii) Condições*

climatológicas - estudos de ventos, a fim de observar se a orientação de pista obtida através dos dados estudados, baseada nesse conceito, está em acordo com a orientação atual das pistas de pouso e decolagem dos locais propostos.

Atualmente, os projetos de aeroportos seguem a recomendação da ICAO em seu Anexo XIV (*International Civil Aviation Organization*) onde a orientação de uma pista deve ser capaz de atender 95% de operacionalidade anual, considerando a componente permitida de vento cruzado em uma pista (HORONJEFF et al., 2010).

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho inclui: a escolha dos aeroportos, a obtenção e análise do banco de dados; e os passos necessários para alcançar os resultados.

3.1 Escolha dos Aeroportos

Foram escolhidos três aeroportos de estudo com a intenção de analisar as respectivas orientações de pista: (i) Aeroporto Internacional de Guarulhos/São Paulo (SBGR), principal porta de entrada internacional do País, localizado na região sudeste, com duas pistas paralelas escalonadas (Pista 10L-28R, com 3700 m de comprimento por 45 m de largura; e Pista 10R-28L, com 3000 m de comprimento por 45 m de largura) (DECEA, 2022); (ii) Aeroporto Internacional de Recife/Guararapes (SBRF), um dos principais aeroportos turísticos do País, localizado na região nordeste, apresenta configuração de pista única de 2751 m de comprimento por 45 m de largura (DECEA, 2023); e (iii) Aeroporto Regional de Barreiras/Bahia (SNBR), por ser aviação regional, um dos maiores centros econômicos e principal polo educacional e tecnológico da Bahia, e pela sua condição excepcional de direções e intensidades de ventos. O Aeroporto de Barreiras contava com quatro pistas de pouso e decolagem que se cruzavam no centro. Atualmente, porém, apenas uma está ativa e sendo utilizada, Pista 08-26, com 1605 m de comprimento por 30 m de largura. A cabeceira 08 apresenta maior frequência de pousos e a 26 maior frequência de decolagens.

Todos os aeroportos citados apresentam reportes de ocorrências devido à alta taxa de ventos cruzados existentes em suas pistas.

3.2 Etapas da Pesquisa Metodológica

Para fins estudos que permitam entender, teorizar e analisar as orientações de pista atuais e os modelos gerados após análise de ventos e suas respectivas curvas probabilísticas. Desse modo, pretende-se analisar 3 variáveis (ASHFORD et al. 2011):

i) vento, direção horária;
ii) vento, rajada máxima (nó/s); e
iii) vento, velocidade horária (nó/s).

Dentro das que foram obtidas e tratadas nos dados meteorológicos do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, colhidos de duas estações automáticas: Barreiras e Recife; e duas convencionais: Barreiras e Guarulhos, a fim de gerar anemogramas de ventos destes locais utilizando linguagem Python, e análises de curvas de distribuição probabilística e estatística.

Serão gerados modelos após análise de ventos e suas respectivas curvas probabilísticas, buscando entender como e qual destes modelos pode melhor descrever o comportamento dos principais ventos médios locais e a influência resultante na orientação das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos de estudo.

3.3 Tratamento dos Dados Meteorológicos

Para idealizar esta pesquisa, utilizou-se duas bases de dados meteorológicos existentes para análise dos ventos, uma que disponibiliza dados abertos: INMET, que traz uma vasta série de registros meteorológicos nacionais disponíveis por cidade e estação meteorológica - automática e/ou convencional, e as variáveis de ventos analisadas foram os dados de: direção, rajada máxima e velocidade horária.

Esses dados foram obtidos, primeiramente do site do INMET, no mês de junho/2023, e posteriormente foram solicitados novamente via e-mail nos dias 15 e 16/08/2023, com o intuito de verificar mais informações dos dados quando solicitados. Adicionalmente, foram obtidos os dados nos sites: *Windfinder* - que gera análises mensais e em tempo real bastante robustas, trazendo

informações de direção e velocidade dos ventos. Foram observados parâmetros de referência dos dados do INMET.

Para garantir a qualidade das análises, foram realizados tratamentos no banco de dados oficiais, conforme descrito, com o objetivo de suprimir possíveis erros de digitação e valores incongruentes que poderiam impactar e distorcer as análises realizadas. Após tratamento de dados, foram obtidos 20.976 mil linhas de dados: Aeroporto de Barreiras - 68272; Aeroporto de Guarulhos - 83721; e Aeroporto de Recife/Guararapes - 58293, com os seguintes horizontes temporais para os 3 aeroportos: Guarulhos e Barreiras - 10 anos que correspondem de 31/07/2013 a 31/07/2023, Guararapes-Recife - que corresponde 31/07/2013 à 12/11/2021, horizonte temporal de 8 anos por ausência de dados nos últimos dois anos.

As análises e o pré-processamento dos dados foram realizados em ambiente Python com auxílio da biblioteca *Pandas* juntamente à biblioteca *Windrose*, responsável por criar os anemogramas.

A direção e a velocidade dos ventos, que são os elementos-foco essenciais desta pesquisa, foram tratados em um *data frame*, de forma a padronizá-los, visto que estavam com títulos e tipagem de dados diferentes, além de haver divisões entre rajada máxima e vento horário.

Com estas duas colunas, criou-se uma nova com o seguinte critério: se existir rajada máxima substitua pelo vento horário, caso não mantenha o mesmo, pois os ventos de alta intensidade geram riscos às operações aeroportuárias, por fim as velocidades dos ventos foram convertidas de m/s, para nó (knot).

Vale a pena ressaltar que durante o desenvolvimento metodológico, os dados do INMET não foram lidos diretamente com a biblioteca *Pandas*, pois estavam em "*unicode"* desconhecido e diferente do padrão UTF-8 (8-bit *Unicode Transformation Format*), apesar que apontam para o ANSI (*American National Standards Institute*), mas, mesmo com este unicode o problema de leitura ainda persistia.

Desta forma o tratamento inicial foi realizado com funções nativas do Python para trabalhar diretamente com arquivos pela limitação do unicode, após isso os dados foram lidos pela biblioteca *Pandas*.

Outro ponto que trouxe muitas dificuldades para a análise, foi a duplicidade dos dados baixados do INMET pois, em um dos banco de dados havia 420 mil linhas de dados brutos e retirando os duplicados, restaram somente 58 mil linhas, além das datas e horas fora de padrão, em que iniciaram anotando de uma forma (12:00:00) e terminaram de outra (1200 UTC), valores negativos de 4ª ordem, dados que causavam distorções na análise, portanto a eliminação destes ruídos, é de extrema importância e a limpeza nos dados faz essencial para se obter uma análise mais rica e veraz.

As Tabelas 1 e 2 elencam os tipos de dados do estudo.

Tabela 1 Dados recebidos. Fonte: INMET, 2023.

DADOS DISPONIBILIZADOS PELO INMET - BDMEP				
Descrição dos dados				
Nome	SÃO PAULO (MIR.de SANTANA)	GUARARAPES	BARREIRAS	
Local	São Paulo	Recife- PE	Bahia	Bahia
Código IATA	GRU	REC	BRA	BRA
Código ICAO	SBGR	SBRF	SNBR	SNBR
Codigo Estação	83781	A301	83236	A402
Latitude	-23,49638888	-8,05916666	-12,15583333	-12,12472221
Longitude	-46,61999999	-34,95944444	-45,00833333	-45,02694443
Altitude	785,16	10	447,51	474,17
Situação	Operante	Operante	Operante	Operante
Data Inicial	1975-01-01	21/12/2004	01/01/1961	19/12/2001
Data Final	2023-09-17	2023-09-17	17/09/2023	17/09/2023
Periodicidade da Mediçãc	Horária	Horária	Horária	Horária

Tabela 2 Variáveis escolhidas. Fonte: INMET, 2023.

VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS RECEBIDAS E VARIÁVEIS ESCOLHIDAS	
1. Data da medição	13.Temperatura do ar - bulbo seco, horária (â°c)
2. Hora da medição	14.Temperatura do ar - bulbo úmido, horária (â°c)
3. Ch (nuvens altas) (código)	15.Temperatura do ponto de orvalho (â°c)
4.Cl (nuvens baixas) (código)	16.Temperatura máxima na hora ant. (aut) (°c)
5.CM (nuvens medias) (código)	17.Temperatura mínima na hora ant. (aut) (°c)
6.Nebulosidade, horaria (décimos)	18.Umidade rel. Max. Na hora ant. (aut) (%)
7.Precipitacao total, horário (mm)	19.Umidade rel. Mín. Na hora ant. (aut) (%)
8.Pressao atmosférica ao nível da estação, horaria (mb)	20.Umidade relativa do ar, horária (%)
9.Pressao atmosférica ao nível do mar, horaria (mb)	**21.Vento, direção horária (gr) (° (gr))**
10.Pressão atmosférica max.na hora ant. (aut) (mb)	**22.Vento, rajada máxima (nó/s)**
11.Pressão atmosférica min. Na hora ant. (aut) (mb)	23.Vento, velocidade horária (m/s)
12.radiacao global (kj/m²)	**24.Vento, velocidade horária (nó/s)**
	25.Visibilidade, horária (código)

3.4 Tratamento Estatístico dos Dados

Uma vez com o banco de dados tratado e normalizado, buscou-se os dados de declinação magnética dos aeroportos selecionados, obtidos através do N.O.A.A (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), segundo site oficial.

Sabendo que a declinação magnética da Terra, sofre interferências das correntes de convecção geradas pelos movimentos das placas tectônicas e do seu campo magnético, tem-se alteração da posição dos ventos além das interferências climáticas como *El Niño* e *La Niña* no Pacífico resultando em extremos climáticos ao redor do globo (PORTILLO, 2019).

A declinação magnética foi calculada no site N.O.A.A. utilizando a latitude e longitude dos locais obtidas via Google Earth®. Com os dados da declinação magnética dos três sítios aeroportuários selecionados e os dados dos ventos locais, buscou-se produzir os anemogramas e análises gráficas e a posteriori curvas de distribuição probabilística das velocidades e das frequências de ventos locais que nos permitam entender como se comportam estes ventos ao decorrer do horizonte temporal proposto.

Foram escolhidos quatro tipos de distribuições para analisar os dados de ventos, sendo: a primeira delas a **Distribuição Generalizada de Valores Extremos** (*Generalized Extreme Value Distribution - GEV*) com o propósito de identificar eventos excepcionalmente extremos conforme o trabalho de Bali (2003) demonstra, buscando analisar assim casos raros e de baixa probabilidade de ocorrência, como ventos fortes.

O segundo tipo de distribuição analisada é a de **Weibull**, e de acordo Lai *et al* (2006) apontam, Weibull é uma ferramenta estatística comumente usada em análises de confiabilidade e sobrevivência e para análise de falhas de um produto. Esta curva apresenta as mesmas características da curva *GEV,* que é para eventos extremos, tais como os eventos de baixa probabilidade de ocorrência, contribuindo para esse tipo de análise, que é crucial para tomar decisões sobre infraestrutura, e para avaliar riscos e eventos climáticos extremos, contribuindo para decisões informadas sobre as condições climáticas locais.

Para a terceira distribuição, será analisada a distribuição **Log-Normal**, que é uma ferramenta estatística essencial em diversas áreas, tais como medicina, biomedicina e economia como apontam Gupta *et al* (2006). Um ponto a se atentar é sobre séries de números negativos, já que não existe log de números negativos, pois não existem valores de ventos negativos e ventos de valor zero foram removidos da análise para evitar dados infinitos, já que log de zero é infinito. Sua importância reside na capacidade de descrever e compreender dados que não seguem uma distribuição normal padrão, oferecendo insights valiosos para análises estatísticas e tomada de decisões.

Por último, será analisada a distribuição de **Gumbel**, já que ela é amplamente utilizada em casos hidrológicos de modelagem extrema de precipitação conforme aponta Koutsoyiannis (2003). Assim a curva de Gumbel também virá para analisar casos de ventos raros de acontecer, conforme as curvas anteriores.

Desta forma, a análise das quatro curvas objetiva identificar aquela que melhor representa a distribuição dos ventos para cada aeroporto em estudo, visto que uma determinada distribuição que descreve um local não necessariamente descreve outro por conta das particularidades de cada local.

A finalidade é verificar qual ou quais seriam a melhor escolha de distribuição de probabilidade e que descrevem mais

assertivamente aquele local, e que de certa maneira podem servir para auxiliar na previsão de eventos indesejáveis futuros, buscando melhorar a operacionalidade e a segurança das operações aeronáuticas.

3.5 Análise de Ventos com Anemogramas desenvolvidos no Estudo

Os dados coletados e processados foram utilizados na biblioteca *Windrose* para criar três variáveis cruciais: i) a direção do vento em graus; ii) a magnitude do vento em nós; e iii) frequência de ocorrência (tamanho das cores nas barras).

Devido às limitações de personalização, foram realizadas adaptações internas no código base da biblioteca para atender aos padrões do RBAC 154 - Emenda nº07 - Apêndice G (ANAC, 2021).

Para a escolha da máxima Componente Permissível de Vento Cruzado, a RBAC nº 154 (ANAC, 2021) recomenda que o pouso ou a decolagem de aviões é impossível, em condições normais, quando:

- no caso de aeronaves cujo comprimento básico de pista é maior ou igual a 1500 m, exceto quando houver, com certa frequência, uma baixa ação de frenagem na pista devido a um coeficiente de atrito longitudinal insuficiente, quando, deve ser assumido um componente de vento de través que não exceda 24 km/h (13 kt);
- 24 km/h (13 kt), no caso de aeronaves cujo comprimento básico de pista é maior ou igual a 1200 m e menor que 1500 m;
- 19 km/h (10 kt), no caso de aeronaves cujo comprimento básico de pista for menor que 1200 m.

Pré-definidos os intervalos padrões de velocidade de ventos para Anemograma, segundo RBAC nº 154 (ANAC, 2021), temos: 0-3, 3-13, 13-25, 25-40 e > 40, pistas com CBP maior ou igual à 1500 m (envolve todos os casos analisados).

Para efeito de análise com os dados coletados, temos que o valor máximo admissível de componentes transversais de través é de 20 kt, portanto foi incluído o anel de 20 kt, ficando assim: 0-3, 3-13, 13-20, 20-25, 25-40 e > 40 a configuração de anéis de velocidades dos ventos.

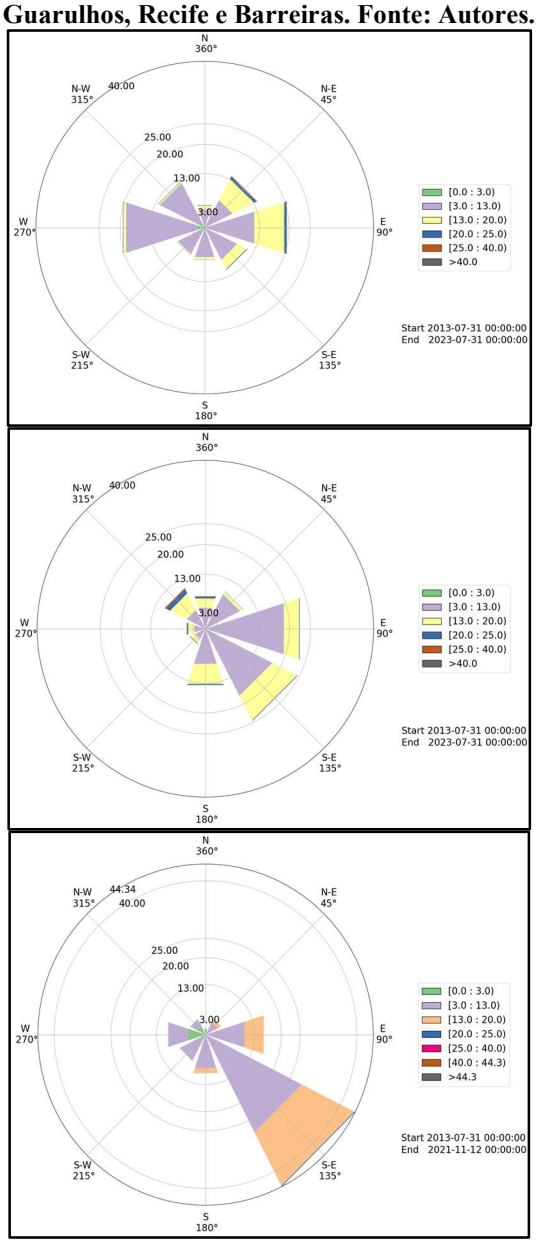
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Anemogramas Obtidos

Após tratamento dos dados (descritos no tópico 3.2), gerou-se anemogramas para os três aeroportos, conforme as Figuras 3, 4 e 5.

Pode-se observar que os dados tratados proporcionaram uma representação mais robusta das condições dos ventos dos últimos 10 anos para Guarulhos e Barreiras e 8 anos para Recife, e tornou possível a análise comparativa da orientação de pista junto com a declinação magnética atualizada. Assim será possível comparar a atual direção e orientação de pista com a simulação dos dados reais e atuais analisados.

Figuras 3, 4 e 5 Anemogramas gerados para Guarulhos, Recife e Barreiras. Fonte: Autores.



4.2 Resultados da Declinação Magnética

Para uma orientação de pista ideal, é imprescindível que a declinação magnética do local seja observada, assim, a latitude e a

longitude dos locais estudados foram obtidas via Google Earth®, e inseridas na calculadora do N.O.A.A. que retorna o valor da declinação magnética para a data escolhida, neste estudo.

Optou-se pelas datas mais atuais: 19 e 20/09/2023, para juntamente aos anemogramas gerados observar e comparar a orientação de pista atual - operante, com a orientação gerada e sugerida após análise.

A Tabela 3 ilustra a síntese dos dados das declinações magnéticas dos locais de análise.

Tabela 3 Declinações magnéticas dos aeroportos em estudo. Fonte: Autores.

DECLINAÇÃO MAGNÉTICA DOS LOCAIS PROPOSTOS						
	PISTA ATUAL			PISTA MODELADA		
Local	Guarulhos	Recife	Barreiras	Guarulhos	Recife	Barreiras
Data	20/01/1985	18/01/1953	01/01/1937	20/09/2023	19/09/2023	19/09/2023
Modelo utilizado	IGRF2020	IGRF2020	IGRF2020	WMM-2020	WMM-2020	WMM-2020
Latitude	23°26'06" S	08°08'31" S	12°04'46" S	23°26'06" S	08°08'31" S	12°08'11" S
Longitude	46°27'44" W	34°55'03" W	45°00'35" W	46°27'44" W	34°55'03" W	44°58'35" W
Declinação magnética	17°16' W	20°51' W	13°59' W	21°54' W	21°28' W	22°32' W
Mudança anual	0°06'	0°03'	0°06'	0°06'	0°06'	0°02'
Incerteza	não listado	0°22'	não listado	0°25'	0°22'	0°22'

De acordo com N.O.A.A., os modelos de campo atuais, como o IGRF e World Magnetic Model (WMM) são precisos para dentro de 30 minutos de arco para a declinação, porém, anomalias locais superiores a 10 graus, embora raras, existem.

4.3 Porcentagem dos Ventos e Fator de utilização de Pista

Após o tratamento dos dados do INMET, foi possível gerar tabelas com as porcentagens da frequência e da direção dos ventos dos locais propostos com o intuito de estimar um fator de utilização e sua influência na orientação de pista encontrada na análise.

A Tabela 4 ilustra os percentuais de ventos dentro e fora da pista de pouso e decolagem (PPD) e o fator de utilização para as análises modeladas dos ventos nos aeroportos de estudo, e são dados de saída gerados na análise em Python que norteiam todo este estudo e a orientação das pistas sugeridas. A Tabela 5 fornece a porcentagem e a orientação dos ventos nos locais de estudo.

Tabela 4 Fator de utilização.

Fonte: Autores.

AEROPORTO	LOCALIZAÇÃO DO VENTO	N-S	W-E	NE-SW	SE-NW	TOTAL (%)	FATOR DE UTILIZAÇÃO
GUARULHOS	DENTRO PPD	14,5650	30,8250	15,0100	36,6460	97,0460	**0,9705**
	FORA PPD	0,3614	0,5810	0,2950	1,7170	2,9544	0,0200
RECIFE	DENTRO PPD	10,5620	26,9050	12,5000	49,5020	99,4690	**0,9947**
	FORA PPD	0,0330	0,2610	0,0120	0,2250	0,5310	0,0053
BARREIRAS	DENTRO PPD	8,4340	42,7290	21,9930	24,7410	97,8970	**0,9790**
	FORA PPD	0,0760	0,8200	0,8555	0,3510	2,1025	0,0210

Tabela 5 Porcentagem de velocidade e orientação média dos ventos. Fonte: Autores.

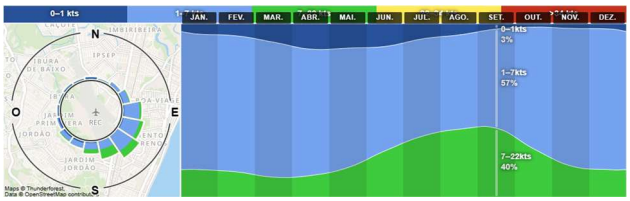
PORCENTAGEM DE VELOCIDADE DOS VENTOS							
GUARULHOS - SP - SBGR							
	[0-3]	[3-13]	[13-20]	[20-25]	[25-40]	[40-*]	
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	0,18	5,25	4,83	1,16	0,36	0,00	11,79
W	0,13	2,86	1,63	0,31	0,09	0,00	5,03
SW	0,12	2,86	1,29	0,13	0,06	0,00	4,48
S	0,28	9,25	5,43	0,29	0,07	0,00	15,32
SE	0,46	18,99	7,13	0,17	0,02	0,00	26,77
E	0,62	20,73	4,12	0,16	0,02	0,00	25,65
NE	0,79	9,28	0,80	0,07	0,02	0,00	10,96
Total	2,59	69,22	25,23	2,30	0,64	0,01	100,00
GUARARAPES - RECIFE - SBRF							
	[0-3]	[3-13]	[13-20]	[20-25]	[25-40]	[40-*]	
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	2,46	2,18	0,03	0,00	0,00	0,00	4,67
W	4,87	5,69	0,04	0,00	0,00	0,00	10,59
SW	1,39	6,34	0,13	0,00	0,00	0,00	7,86
S	0,50	8,77	1,37	0,03	0,00	0,00	10,67
SE	0,20	28,81	15,87	0,22	0,00	0,00	45,09
E	0,11	10,88	5,39	0,02	0,00	0,00	16,41
NE	0,16	3,46	1,06	0,01	0,00	0,00	4,70
Total	9,68	66,13	23,89	0,29	0,01	0,00	100,00
BARREIRAS - BAHIA - SNBR							
	[0-3]	[3-13]	[13-20]	[20-25]	[25-40]	[40-*]	
N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NW	1,58	11,01	0,38	0,08	0,05	0,00	13,10
W	2,22	18,83	0,72	0,12	0,03	0,00	21,92
SW	1,02	6,54	0,30	0,04	0,02	0,00	7,92
S	0,82	6,97	0,64	0,06	0,01	0,00	8,51
SE	0,54	8,60	2,64	0,18	0,04	0,00	11,99
E	0,48	12,92	7,57	0,57	0,09	0,00	21,63
NE	0,39	7,97	5,77	0,66	0,14	0,00	14,93
Total	7,04	72,83	18,03	1,72	0,38	0,00	100,00

4.4 Orientações de Pistas Propostas

Com os dados analisados, foi possível realizar o comparativo na orientação de pista/numeração de pistas.

Para efeitos de comparação, também foram observados para a análise com os dados mensais e diários de orientação e velocidade de Guarulhos, Recife e Barreiras respectivamente, gerados pelo Windfinder® para auxiliar nas análises, como o Anemograma de Recife ilustrado pela Figura 6, representando a distribuição e frequência dos ventos do mês 09/2023. Esta análise se deu em todos os locais estudados.

Figura 6 Anemograma mensal do Aeroporto de Recife. Fonte: Windfinder, 2023.



Por fim, plotou-se os Anemogramas e fez-se os cálculos para encontrar o melhor resultado de orientação de pista, a orientação ideal sugerida é mais próxima das necessidades reais destes aeroportos - considerou-se os dados dos ventos e da declinação magnética nos locais propostos.

Podemos observar na Tabela 6 que, após rodarmos as análises com os dados obtidos no horizonte temporal proposto - 8 anos para Recife e 10 anos para Guarulhos e Barreiras, eles nos fornecem uma orientação de pista com uma diferença angular da atual, isto mediante o estudo das frequências e orientação da distribuição dos ventos nos locais propostos, mostrando a importância deste tipo de análise dado à importância que os dados de ventos têm para a segurança operacional nos aeroportos, principalmente no que tange os procedimentos de pouso e decolagem, responsáveis por mais de 40% dos acidentes e incidentes aeronáuticos.

Tabela 6 Comparativo da orientação de pista: Atual x modelada, o Modelo Python.
Fonte: Autores.

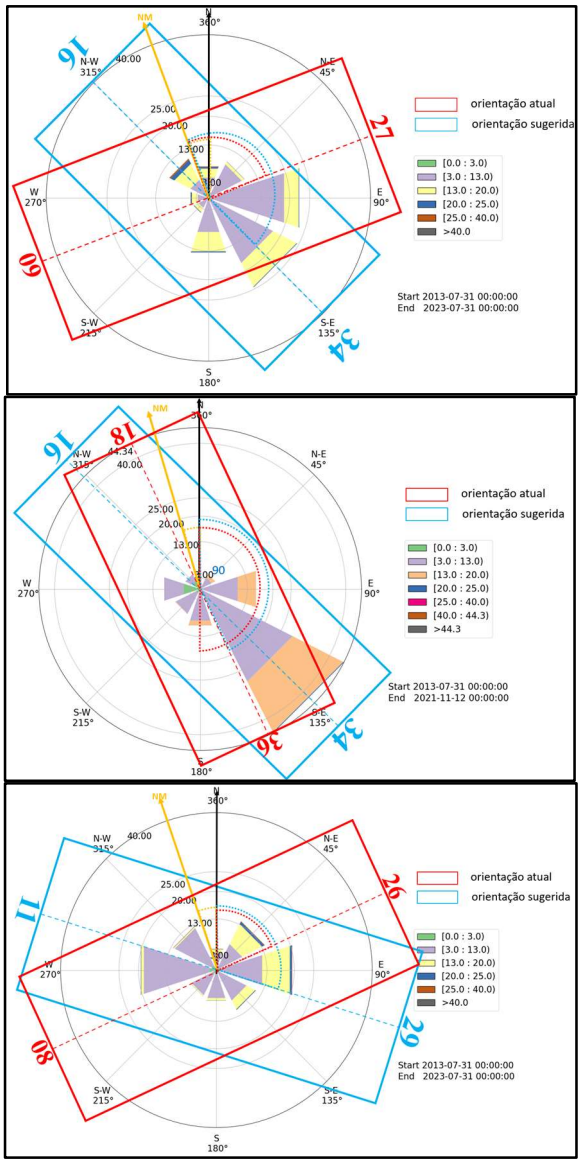
DATA DOS DADOS	AEROPORTOS	DECLINAÇÃO MAGNÉTICA	RUMO MAGNÉTICO (RM)	CABECEIRAS PPD	PISTAS ATUAL X MODELADA
			PISTA ATUAL		
20/01/1981	Guarulhos	17°16' W	73° + 17°16' W = 90°16'	09 — 27*	
18/01/1953	Recife	20°51' W	161° + 20°51' W = 181°51'	18 — 36	
01/01/1937	Barreiras	13°59' W	62° + 13°59' W= 75°59'	08 — 26	
			PISTA MODELADA SUGERIDA		
20/09/2023	Guarulhos	21°54' W	135° + 21°54'W = 156°54'	16 — 34	47°09'00"
19/09/2023	Recife	21°28' W	135° + 21°28' W = 156°28'	16 — 34	25°23'00"
19/09/2023	Barreiras	22°32' W	90° + 22°32' W= 112°32'	11 — 29	36°33'00"

*Atualizada em *08/09/2022.

As Figuras 7, 8 e 9 ilustram respectivamente as orientações de pista atuais e sugeridas respectivamente para Guarulhos, Barreiras e Guararapes.

Figuras 7, 8 e 9 Anemogramas comparativos da orientação de pista atual x pista modelada: Aeroportos de Guarulhos, Recife e Barreiras.

Fonte: Autores.



4.5 Curvas de Distribuição dos Ventos

Dentre as curvas plotadas para os ventos do Aeroporto de Guarulhos, a que mais se ajusta conforme a Figura 10 é a distribuição de ***Weibull*** com parâmetros *Loc:* 2.3453 *e Scale:* 11.9246. Isso se deve a três fatores. Primeiro, está mais centralizada nos eixos das abscissas em relação aos dados, comparado com as demais curvas. Segundo o seu ajuste de altura perante todas as barras do histograma, pois há dados de frequência diversos e a *Weibull* está entre a concentração dos dados abaixo da curva e dos dados dispersos acima da curva, deixando-a com a abrangência maior nos dados.

Por último, sobre os ventos abaixo de 5 kt e ventos acima de 15 kt, sua cauda está acima das demais curvas, demonstrando que nessas regiões extremas seu ajuste foi melhor

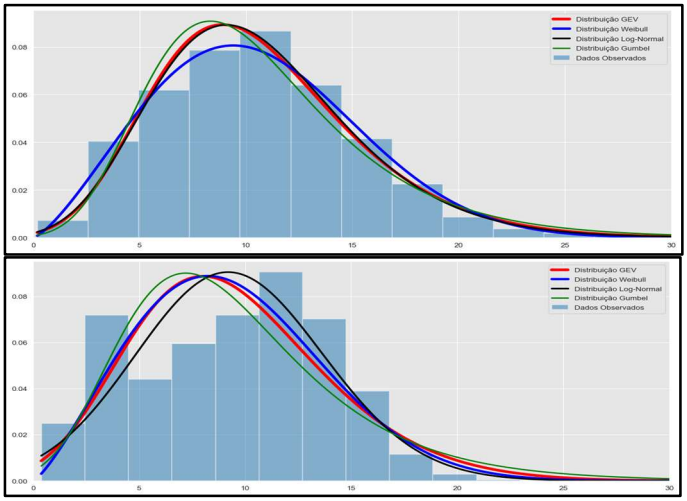
que as demais, aferindo melhor os casos de baixa probabilidade.

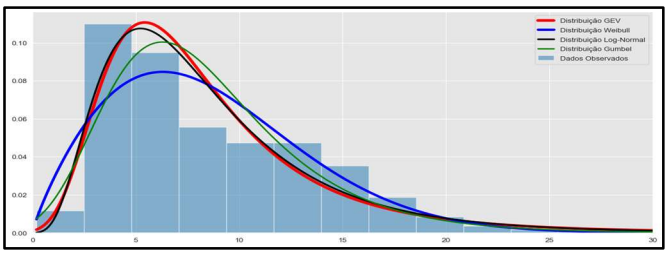
No caso dos dados do Aeroporto de Recife, Figura 11, é observável a presença de dois picos. Além disso, na faixa central onde as curvas foram ajustadas, não existe um horizonte de eventos que reforcem um ajuste ótimo para as curvas probabilísticas usadas. Entretanto, levando em consideração que o primeiro pico são ventos de 5 kt, isso não fará um impacto significativo na operação aeroportuária, já que é aceitável um limite.

Já para as curvas plotadas para os ventos do Aeroporto de Barreiras, a que mais se ajusta, conforme a Figura 12, é a distribuição de Gumbel com parâmetros *Mu:* 8.3387 *e Beta:* 4.0524.

Isso se deve ao fato de que foi bem ajustada para eventos de alta probabilidade de ocorrência tais como ventos acima de 5 kt, e representa razoavelmente bem os eventos raros, ficando atrás somente da curva Weibull para ventos acima de 13 kt já que curva Weibull passa acima da Gumbel, desta forma tendo boa representatividade sobre os dados coletados, melhor visualização, isso suprime eventos raros tais como os acima de 40 kt que podem ser vistos nos anemogramas supracitados.

Figuras 10, 11 e 12 Curvas de distribuição - Aeroporto de Guarulhos, Recife e Barreiras - SP.
Fonte: Autores.





Portanto, dentre os dados apresentados para o aeroporto de Recife, a curva que mais se ajusta é a curva de Log-Normal, pois, tem boa centralidade para os eventos acima de 10 kt comparadas com as demais, além do que ela está acima das outras curvas, logo sua representatividade sobre a probabilidade de ocorrência desses ventos é mais eficiente.

Por fim, obteve-se como síntese dos resultados desta seção, a Tabela 7, consolidando as curvas que tem uma maior representatividade perante os dados coletados de seu respectivo aeroporto no horizonte de eventos de 10 anos selecionado.

Tabela 7 Curvas de distribuição.
Fonte: Autores.

Aeroporto	Curva	Média	Covariância (%)	Desvio padrão
Guarulhos	Weibull	0.02099	139.36%	0.02820
Barreiras	Gumbel	0.02168	146.98%	0.03187
Recife	Log-Normal	0.02392	131.15%	0.03138

Tal escolha influencia diretamente na segurança das operações aéreas, ao estabelecer limites de vento seguros para pousos e decolagens, bem como na eficiência operacional ao otimizar rotas de voo e determinar o fator de utilização do respectivo aeroporto.

Também é crucial para avaliar riscos climáticos, apoiando a tomada de decisões em caso de eventos climáticos extremos, contribuindo para um planejamento mais seguro, eficiente e eficaz das operações aeroportuárias.

A Tabela 8 ilustra os resultados das análises baseadas nos dados do INMET e demonstram o percentual de ventos frontais, través e de cauda para a pista atual e para a pista modelada, ilustrando o percentual comparativo de aproveitamento de ventos da pista atual e da pista modelada dos locais em análise.

Tabela 8 Percentual de ventos dos locais propostos. Fonte: Autores.

GUARULHOS												
VENTOS PREDOMINANT	ESE-WNW	NE-SW	N-S	SE-NW	ENE-WSW	NNE-SSW	SSE-NNW	W-E	%VENTOS TOTAIS	%VENTOS FRONTAIS	%VENTOS CAUDA	%VENTOS TRAVÉS
DENTRO PPD	4,951	9,363	10,090	23,487	14,109	8,814	6,483	18,837	96,136			
FORA PPD	0,684	0,191	0,296	1,158	0,220	0,273	0,730	0,311	3,864			
ATUAL (09—27)	4,951	9,363	10,090	23,487	14,109	8,814	6,483	18,837		41,760	9,363	45,012
MODELADA (16—34)	4,951	9,363	10,090	23,487	14,109	8,814	6,483	18,837		77,959		18,177
RECIFE												
DENTRO PPD	7,104	9,484	7,491	37,518	10,632	8,037	1,463	18,022	99,751			
FORA PPD	0,003	0,005	0,013	0,192	0,003	0,021	0,000	0,013	0,249			
ATUAL (18—36)	7,104	9,484	7,491	37,518	10,632	8,037	1,463	18,022		53,575	8,037	38,139
MODELADA (16—34)	7,104	9,484	7,491	37,518	10,632	8,037	1,463	18,022		90,267	8,037	9,484
BARREIRAS												
DENTRO PPD	14,247	11,815	4,647	12,860	18,679	8,050	3,141	24,467	97,906			
FORA PPD	0,087	0,539	0,036	0,154	0,555	0,205	0,080	0,437	2,094			
ATUAL (09—27)	14,247	11,815	4,647	12,860	18,679	8,050	3,141	24,467		82,068		15,838
MODELADA (16—34)	14,247	11,815	4,647	12,860	18,679	8,050	3,141	24,467		89,856		8,050

5. CONCLUSÕES

Com os resultados das análises, observou-se que os aeroportos mais afetados pela ação dos ventos para procedimentos de pouso e decolagem são Guarulhos (SBGR) 40° e Barreiras (SNBR) 30°, enquanto o aeroporto de Guararapes (SBRF) apresenta a menor variação angular 20°, como relatado pela ANAC e pilotos em registros de ocorrências de voos, o que compromete a segurança e a operacionalidade de acordo com as normas da ICAO.

A proposta final do artigo consistiu em desenvolver um modelo utilizando análise de dados, estruturação e tipagem das informações de direção, frequência e velocidade dos ventos, empregando a linguagem Python e suas bibliotecas de análise de dados. O objetivo central foi evidenciar as discrepâncias na orientação das pistas de aeroportos existentes em relação à direção dos ventos atuais e avaliar o possível impacto desses parâmetros sobre o cumprimento das diretrizes de operacionalidade estabelecidas pela ICAO, que preconiza 95% de eficiência operacional.

Para os locais analisados, a orientação de pista proposta seguiu de maneira e termos o melhor fator de utilização, onde alcançamos o índice de 0,9947 para Guararapes-Recife, 0,9705 para Guarulhos-SP e 0,9790 para Barreiras-BA.

De acordo com a tabela 8, os locais que mais tiveram números significativamente positivos foram: Guarulhos, com redução de 75,13% de ventos de través, aumento de 86,68% nos ventos frontais e os ventos de cauda se mantiveram em 9,363%. Para Recife temos uma redução de 59,62% nos ventos de través, aumento de 68,49% nos ventos frontais e os ventos de cauda se mantiveram no patamar, enquanto para Barreiras houve uma redução de 50,692% nos ventos de través e os ventos frontais um aumento de 9,498% e os ventos de cauda foram pouco significativos na análise mediante à sua baixa frequência no horizonte temporal. Vemos assim, que o modelo pode se dizer que cumpriu sua função, pois conseguiu trazer melhorar muito significativas nos ventos frontais, melhorando o aproveitamento e dos ventos e a operacionalidade dos aeroportos, porém, muito mais que isso, foram os resultados bastante interessantes com relação à redução dos ventos de través, que colocam as operações de decolagem e pouso num patamar de menor segurança, dificultando o trabalho dos profissionais da aviação.

Para trabalhos futuros, recomendamos duas possíveis pesquisas, primeira é usar os mesmos dados de ventos disponíveis com mesmo tratamento inicial para aplicar a *Escala de Beaufort*, escala empírica que classifica a intensidade dos ventos, e buscar treinar um modelo de inteligência artificial para prever a classificação do próximo vento de 1 hora com dados passados, se a precisão for boa o bastante irá auxiliar pilotos de aeronaves a evitar horários de riscos, além de já ter um nível de confiança que não terá problemas no pouso com a aeronave.

Para um segundo ponto possível deste trabalho, consistiria em utilizar a curva de ventos característica do aeroporto identificada nesta pesquisa para realizar previsões relacionadas aos ventos futuros. Isso poderia abranger a identificação dos horários de maior risco, a análise dos meses com maior probabilidade de ocorrência de ventos críticos

e a avaliação da possibilidade de alteração do ângulo de pista ao longo do tempo. Além disso, seria possível determinar quando a mudança no ângulo da pista poderia ocorrer, o que forneceria insights sobre a potencial vida útil da pista existente ou projetada. Adicionalmente, seria relevante replicar as mesmas análises, concentrando-se exclusivamente em dados relacionados a condições chuvosas.

6. REFERÊNCIAS

ANAC. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Rajadas de Vento. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/condicoes-meteorologicas-adversas-para-o-voo/rajadas-de-vento. Acesso em: 8 jul. 2023.

ANAC. PROJETO DE AERÓDROMOS. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL RBAC nº 154, EmD 07. julho, 2021. Disponivel em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-154/@@display-file/arquivo_norma/RBAC154EMD07%20-%20retificado.pdf

BANDEIRA, M. C. G. S. P. Orientação de pista. Material de aula, Curso de Aeroportos - Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, 57 slides, 2023.

BALI, Turan G. The generalized extreme value distribution. Economics Letters, [S. l.], v. 79, n. 3, p. 423–427, 2003. DOI: 10.1016/S0165-1765(03)00035-1. Acesso em: 12 abr. 2020. Acesso em: 10 jul. 2023.

CARDOSO, M. Pistas do aeroporto de Guarulhos já estão com nova numeração. 2022. Disponível em: https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/pistas-do-aeroporto-de-guarulhos-ja-estao-com-nova-numeracao.htmlAcesso em: 18 set. 2023.

DECEA. Departamento de Controle Do Espaço Aéreo. Carta de Aeródromo – RECIFE / Guararapes - Gilberto Freyre, INTL (SBRF). Comando Maior da Aeronáutica, AIRAC AMDT 2309A1. SET., 2023.

DECEA. Departamento de Controle Do Espaço Aéreo. Carta de Aeródromo – RECIFE / Guararapes - Gilberto Freyre, INTL (SBRF). Comando Maior da Aeronáutica, AIRAC AMDT 2309A1. SET., 2023.

DECEA. Departamento de Controle Do Espaço Aéreo. SÃO PAULO / Guarulhos - Gov. André Franco Montoro, INTL (SBGR). Comando Maior da Aeronáutica, AIRAC AMDT 2209A1. SET., 2022.

DEL FINCO, R.M.; SANTIAGO, C. L.; LOPES, L. A. S. Revisão das Dimensões das Pistas do Aeroporto Santos Dumont – Rio De Janeiro. Anais do XXXI ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Área: Infraestrutura, Recife, p.1086-1097, 2017.

KAZDA, A.; CAVES, R. E. Airport design and operation. 2007.

GITHUB. Pandas Guide — Pandas Guide documentation. 2017. Disponível em: https://pandasguide.readthedocs.io/en/latest/. Acesso em: 15 jul. 2023.

GUPTA, R. C., & Li, X. (2006). Statistical inference for the common mean of two log-normal distributions and some applications in reliability. Computational Statistics & Data Analysis, 50(11), 3141–3164. DOI: 10.1016/J.CSDA.2005.05.005

HORONJEFF, Robert et al. Planning and design of airports. McGraw-Hill, 2010.

HUNTEER, John; DALE, Darren; FIRING, Eric; DROETTBOOM, Michael. Users guide — Matplotlib 3.5.2 documentation. 2002. Disponível em: https://matplotlib.org/stable/users/index.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodrome Design and Operations. 5. Ed. Montreal, 2009.

KOUTSOYIANNIS, Demetris. On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall. In: Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna. 2003. p. 24-25.

LAI, C.-D., Murthy, D. N., & Xie, M. (2006). Weibull Distributions and Their Applications. Springer Handbook of Engineering Statistics, 63–78. doi:10.1007/978-1-84628-288-1_three

NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER. NCEI Geomagnetic Calculators. 2017. Disponível em: https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true. Acesso em: 15 jul. 2023.

PAMPLONA; ALVES, C. J. P. a correta orientação de uma pista de pouso para o planejamento de um aeroporto. Ed. 6, vol. 1, artigo nº 1, Maio/Agosto de 2013.

PORTILLO, Germán. O que é declinação magnética, quão importante é e para que serve? 2019. Disponível em: https://www.meteorologiaenred.com/pt/declina%C3%A7%C3%A3o-magn%C3%A9tica.html. Acesso em: 16 jul. 2023.

PASTANA, C. E. T. Principais Requisitos de Topografia para Projeto de Estradas – 1/3. Aula 3: 200794 – Pavimentos de Estradas I. Unimar. 2017.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python Release Python 3.11.3. 2001. Disponível em: https://www.python.org/downloads/release/python-3113/. Acesso em: 15 jul. 2023.

SAC/MINFRA-ITA. MANUAL DE PROJETOS AEROPORTUÁRIOS. Parceria entre a Secretaria Nacional de Aviação Civil – SAC/MINFRA e o Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Versão 1.0, Brasília, DF: 2021.

WEATHER SERVICE US NATION. EARTH: uma mapa global do vento, tempo, e condições do oceano. 2023. Disponível em: https://earth.nullschool.net/pt/#current/wind/surface/level/orthographic=-69.46. Acesso em: 15 jul. 2023. WELLS, A. T. Airport planning & management. 1992. Acesso em: 10 jul. 2023.

WINDFINDER.COM. Windfinder - wind, wave & weather reports, forecasts & statistics worldwide. 2023. Disponível em: https://pt.windfinder.com/#4/-11.7383/-44.56

SISTEMA DE DESACELERAÇÃO COM MATERIAIS PROJETADOS (EMAS) – IMPLANTAÇÃO E RISCOS

Mário Rueda Júnior[1], Rita Moura Fortes[2]
1 - Instituto Federal de São Paulo – IFSP, Curso de Pós-graduação em Aeroportos – Projeto e Construção,
2 - Instituto Federal de São Paulo – IFSP, Professor Sênior da Pós-graduação em Aeroportos – Projeto e Construção

*** Corresponding author e-mail address**: marioruedajr@gmail.com

PAPER ID: SIT2299

ABSTRACT

The constant updating of safety standards is one of the biggest concerns of airport engineering and landing and takeoff procedures are responsible for most occurrences on airport runways, whether due to human error, equipment failure and poor surface or meteorological conditions, and that may cause loss of life, various material damages and partial or complete stoppage of operations. Initially, the FAA added to its procedures the definition of Runway Safety Area (RSA), which is a symmetrical space at the end of the runway to increase safety; both for airports in operation and for new projects, but when there are not ideal conditions to adopt a typical default security area qualifies this area as non-default. With the objective of overcoming these adverse conditions and minimizing the severity of an aircraft exceeding the longitudinal limits of the runway, an aircraft deceleration system capable of providing security regarding the referred event in the so-called non-standard security areas was developed. This deceleration system is usually called EMAS (Engineered Material Arresting System) and the analysis process for its implementation must be considered unique, as a mathematical model is used as the basis for calculation in the largest aircraft in the airport mix at a given speed, in addition to runway dimensions and mapping of local conditions and interference. This study aims to present the constructive details, functionality and recovery and a risk assessment of the EMAS system based on the events of the case study.

Keywords:EMAS. Security area. Landing and take-off. Risk. Implantation.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existe um sistema de desaceleração de aeronaves que é executado por dois procedimentos construtivos utilizando materiais distintos e atendem aos padrões técnicos exigidos pela Administração Federal de Aviação (*Federal Aviation Administration* - FAA) e pela Organização Internacional da Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization* – ICAO).

A FAA, antes de adotar o conceito de área de segurança com a utilização do sistema EMAS, envolveu-se em um estudo que indicou padrões de velocidade e de distância percorrida por aeronaves que ultrapassavam os limites longitudinais da pista durante os procedimentos de pouso ou decolagem abortada, o chamado *overrun* (FAA1, 2012).

O evento *overrun*, independente dos fatores contribuintes, causou vários incidentes em aeroportos ao redor do mundo e algumas vezes com resultados desastrosos. O aumento desta ocorrência deu-se à medida que o tráfego aéreo global cresceu e o fator humano tornou-se uma condição decisiva de garantia direta ou indireta contra os acidentes, seja na concepção de projetos específicos, construção e manutenção ou nas operações de pouso e decolagem.

Neste contexto, a FAA adicionou aos seus procedimentos a definição de Área de Segurança de Pista (*Runway Safety Area* – RSA) e a ICAO, ANAC (RBAC nº 154) e outros órgãos internacionais adotaram a definição de Área de Segurança de Final de Pista (*Runway End Safety Area* – RESA), ambas são áreas simétricas e definidas como área de segurança padrão, tanto para a adequação quanto para a construção de novos aeroportos.

O dimensionamento de uma área de segurança padrão é determinado por diretrizes elaboradas por entidades competentes que adotam o mesmo conceito técnico para proteger as operações em uma pista, mas quando não há dimensões ideais para se adotar uma área de segurança padrão esse espaço tornando-se uma área de segurança não padrão.

Destaca-se que após o acidente do voo 901 da *Scandinavian Airlines System,* em 1984, no Aeroporto Internacional John F. Kennedy, cidade de Nova Iorque, o Conselho Nacional de Segurança de Transporte (*National Transportation Safety Board* – NTSB) solicitou, a FAA, uma pesquisa para desenvolver e viabilizar um sistema de parada de aeronaves.

A FAA coordenou um projeto de pesquisa com a cooperação da Universidade de Dayton, da Autoridade Portuária de Nova Iorque e Nova Jersey e da *Engineered Arresting Systems Corporation* (ESCO), atualmente *Runway Safe Inc.*(FAA2, 2018).

Desse modo, foram desenvolvidos cálculos teóricos e modelagem de situações para determinar a distância de parada de uma aeronave com a utilização de materiais de fácil ruptura que agem diretamente sobre o trem de pouso da aeronave, sem gerar problemas de controle e mudança de direção. Por isso, o sistema EMAS ao demonstrar segurança e desempenho previsível durante os testes foi incorporado à área de segurança não padrão para adicionar segurança no final de pista.

Portanto, a implantação do sistema necessita de estudos personalizados com base nas características das aeronaves, nas dimensões, inclinações, elevações da pista e restrições locais, conforme a circular consultiva AC nº 150/5220-22B (FAA1, 2012).

Em meio a esse cenário, a FAA considera que os padrões de segurança exigidos não podem ser alterados ou dispensados, e as áreas de segurança de pista devem receber avaliações constantes. Assim, este trabalho tem objetivo de apresentar os aeroportos que receberam o sistema EMAS e os incidentes nos Estados Unidos, além dos detalhes construtivos, da identificação dos seus benefícios, da eficácia e dos riscos na desaceleração das aeronaves.

2. METODOLOGIA

Este artigo é desenvolvido com base em pesquisa bibliográfica e documental de organizações nacionais e internacionais e tem por finalidade discorrer a respeito de regulamentos, parâmetros e metodologias executivas disponíveis para o cumprimento das exigências dos órgãos envolvidos com as recomendações de implantação do sistema de desaceleração EMAS, mostrar a evolução temporal de implantação do sistema e de

ocorrência dos eventos do tipo *overrun* sobre os sistemas de desaceleração.

Além disso, apresentar o estudo de caso de aeroportos em que aeronaves atingiram o sistema de desaceleração instalado, incluindo informações coletadas em organizações, questionamentos enviados aos respectivos aeroportos acerca das circunstâncias que envolveram os eventos e uma análise de risco após a ocorrência dos incidentes nos Aeroportos de Reading (RDG) – Pensilvânia, Bob Hope/Burbank (BUR) - Califórnia e Charles B. Wheeler/Kansas (MKC) Missouri, todos localizados nos Estados Unidos.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 – Normativas Nacionais e Internacionais

A primeira instrução normativa com objetivo de propor critérios básicos sobre o tema foi emitida pela FAA e outras entidades internacionais, conforme Tabela 1, seguem essas orientações ou elaboraram os seus critérios e diretrizes técnicas contribuindo para o desenvolvimento do tema de segurança em final de pista.

Tabela 1 – Relaçãodas normativas

Órgão Responsável		*Documento*
FAA	EUA	150/5220-22B
		150/5300-13B
		5200.8
		5200.9
ACRP		Report 50
		Report3
ANAC	Brasil	NT 8/2020/GTEA/GCOP/SIA
		RBAC 154 - Emenda 6
ICAO	Organização Internacional - ONU	Anexo 14 - Volume I
		Doc. 9157 - Parte 1
Transport Canada	Canadá	TP312 - 5th Edition
CASA	Austrália	MOS Part. 139
EASA	Agência Europeia	CS-ADR-DSN: Capítulo C
CAAC / CAST	China	MH5111-2015

As normativas englobam concepção de projeto, planejamento, instalações, manutenção e orientam a viabilidade financeira e a equivalência de melhorias, inclusive comparar a alternativa escolhida para o projeto com as condições adotadas em aeroportos que tem o sistema instalado.

3.2 – Evolução - Implantações e Incidentes

Como vimos, há necessidade de aumentar a segurança para diminuir os impactos do evento *overrun* impulsionou o estudo e o desenvolvimento do sistema EMAS, e a partir de testes conclusivos, da aprovação e da regulamentação pelos órgãos responsáveis, deu-se a implantação do sistema em aeroportos que tinham restrições com áreas de segurança no final de pista.

A seguir, serão apresentados dados que abordam a quantidade de sistemas desaceleração implantados e incidentes ocorridos em aeroportos nos Estados Unidos. A Tabela 2 apresenta os aeroportos dos Estados Unidos com incidentes em final de pista e com atuação direta do sistema de desaceleração EMAS nos eventos, detendo as aeronaves, salvando vidas, protegendo ativos e a infraestrutura aeroportuária. Abrange um total de 14 aeroportos com 18 incidentes de aeronaves que transportavam 419 pessoas entre tripulantes e passageiros.

Tabela 2 – Relação dos incidentes em aeroportos dos Estados Unidos (Adaptado de FAA3, 2022)

Ano	*Pessoas*	*Aeronave*	*Aeroporto*
mai/99	30	Saab 340	JFK - NY
mai/03	3	MD-11	JFK - NY
jan/05	3	Boeing 747	JFK - NY
jul/06	5	Falcon 900	GMU-SC
jul/08	145	Airbus A320	ORD-IL
jan/10	34	Bombardier CRJ200	ORW-WVA
out/10	10	G4 Gulfstream	TEB-NJ
nov/11	5	Citation II	DYM-FL
out/13	8	Citation 680	PBI-FL
jan/16	2	Falcon 20	PWK-IL
out/16	37	Boeing 737	LGA-NY
abr/17	**2**	**Citation 750**	**BUR-CA**
fev/18	4	Beech Jet 400A	BKL-OH
dez/18	117	Boeing 737	BUR-CA
fev/19	**1**	**Phenom 100**	**MKC-MO**
fev/21	2	Dassault F900	PWK-IL
jul/21	**9**	**Citation Excel**	**RDO-PA**
set/21	2	N20GX	SUA-FL

A Tabela 3 aborda as informações sobre os aeroportos que implantaram o sistema de desaceleração e que, em algum momento, sofreram uma reforma, substituição ou ampliação dos referidos sistemas, totalizando

117 cabeceiras em 69 aeroportos com instalação do sistema tipo EMASMAX e 4 cabeceiras de um aeroporto com a instalação do sistema tipo greenEMAS.

Tabela 3 – Relação dos sistemas tipo EMASMAX e greenEMAS implantados em aeroportos dos Estados Unidos (Adaptado de FAA3, 2022)

Ano	*Quant.*	*Aeroportos*
1996	1	JFK-NY
1999	1	MSP-MN
2000	1	LIT-AR
2001	1	RST-NY
2002	3	BUR-CA; BTR-LA; BGM-NY
2003	3	GMU-SC; HYA-MA; LIT-AR
2004	3	ROA-VA; FLL-FL
2005	3	LGA-NY; BOS-MA
2006	4	LRD-TX; SAN-CA; TEB-NJ; BOS-MA
2007	4	CRW-WH ; MHT-NH; JFK-NY; DCDV-AK
2008	11	AVP-PA; SBP-CA; ORF-IL; EWR-NJ; CLT-NC; STP-MN; ORH-MA
2009	4	RDG-PA; MKC-MO; ORH-MA; BGM-NY
2010	7	INT-NC; ILG-DE; EYW-FL; ACV-CA; TEX-CO; MKC-MO
2011	12	PBI-FL; FRG-NY; SUT-FL; LFT-LA; CRE-OH; GON-CT; AUG-ME; TEB-NJ
2012	4	ELM-NY; TTN-NJ; EWN-NC
2013	7	MEM-TN; BLK-OH; TEB-NJ; FRG-NY; LFT-LA; TTN-NJ
2014	13	SFO-CA; PVD-RI; ADS-TX; PWK-IL; DCA-DC; FLL-FL; MDW-IL
2015	21	MRY-CA; OAK-CA; OME-AK; ABE-PA; JWN-TN; ADQ-AK; RUT-VT; BDR-CT; MFE-TX; SDF-KY; LGA-NY; EWR-NJ; EYW-FL; PVD-RI; PWK-IL; DCA-DC; MDW-IL
2016	3	VCE-FL; LFT-LA; MDW-IL
2017	3	BCT-FL; PVD-RI
2018	6	PDK-GA; CFG-OH; LFT-LA; LIT-AR; OXC-CT
2019	2	HHH-SC

Analisando a Figura 1, constata-se que houve um crescimento significativo da implantação dos sistemas de desaceleração em aeroportos nos Estados Unidos a partir do ano 2008 e quando observamos o período de 1996 até 2007 aferimos a execução de 2,0 sistemas EMAS/ano e no período de 2008 até 2021 temos a execução de 6,6 sistemas EMAS/ano. Referente aos incidentes observa-se que nos mesmo período houve, respectivamente, 0,33 e 1,0 incidentes/ano.

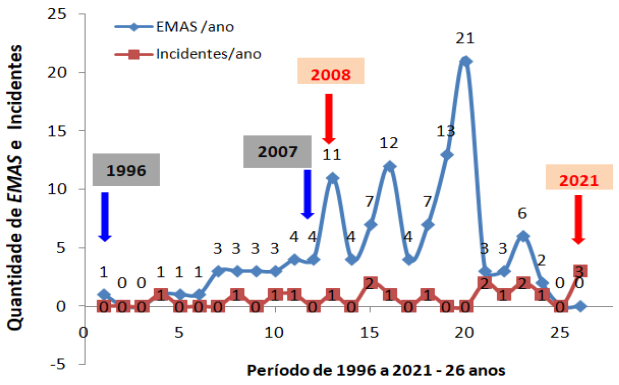


Figura 1 – Evolução temporal de implantações e incidente nos Estados Unidos.

Em meio a essa questão analítica pode-se extrair que nos 18 incidentes não houve vítimas fatais, computando apenas as perdas materiais e paralisação das operações.

3.3 – Parâmetro e caracterização dos materiais

A FAA baseou o programa de pesquisa, para desenvolvimento do sistema EMAS, na elaboração de um parâmetro matemático em condições de pista seca, realizando testes e utilizando materiais com características específicas e uniformes quanto à tensão x deformação, além de desenvolver uma camada de proteção superficial com materiais isolantes e resistentes para prolongar a vida útil de projeto e reduzir a manutenção do sistema.

A Figura 2 ilustra o critério utilizado para determinar a capacidade de ação dos materiais componentes do sistema na desaceleração de aeronaves.

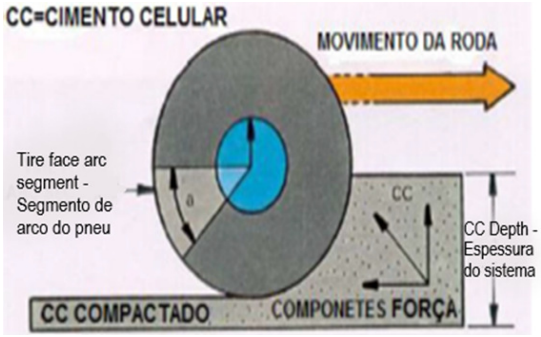


Figura 2 – Modelo conceitual da interface pneu-material para obtenção das forças de arrasto e vertical, taxa de desaceleração e distância de parada (adaptado de INFRAERO, 2020).

Assim, a desaceleração inicia-se a partir do momento que ocorre o contato entre o pneu da aeronave e o material aplicado no sistema, resultando na compressão e deformação permanente do material por ação do deslocamento do pneu e objetivando-se diminuir a energia aplicada à medida que a aeronave percorre e esmaga os materiais que compõem o sistema, conforme mostra a Figura 3 em testes iniciais de tamanho real.

Figura 3 – Teste de desaceleração de uma aeronave B727 sobre um protótipo do EMAS (FAA2, 2018).

Ademais, em nível de realidade local, outros fatores relevantes que devemos observar são a definição da aeronave de projeto e a relação de variáveis geográficas, demográficas, ambientais e sociais para a implantação do sistema, pois a elaboração dos projetos depende diretamente das condições locais disponíveis e considerando que nenhuma pista é igual, ou seja, os projetos são direcionados a uma personalização de dimensões, espessuras e resistências para oferecer um desempenho ideal.

Logo, as empresas certificadas que fabricam o sistema EMAS devem elaborar a memória de cálculo, o projeto e especificar os materiais a serem utilizados. Essas empresas precisam atender as instruções e exigências descritas nas normativas e os projetos devem ser analisados e aprovados por órgãos responsáveis.

Desse modo, para o estudo de um projeto, devem-se adotar critérios como as cargas do trem de pouso permanecendo abaixo dos limites projetados para minimizar qualquer dano estrutural ao mesmo, reduzir uma possível ruptura do tanque de combustível, permitir fácil acesso e condições de manobras para os veículos de combate a incêndio e de resgate, rapidez no desembarque e fuga dos passageiros e tripulantes. Além de, apresentar praticidade na realização dos serviços de manutenção, incluindo demolição e reparo do sistema.

Os materiais de vedação e o acabamento superior devem oferecer resistência às condições climáticas, a agressividade do meio e ao jato das aeronaves. O teste de simulador de jato proporcionou condições de analisar a reação e a resistência dos materiais que integram o acabamento superficial quanto aos danos que possam ocorrer durante um procedimento de decolagem, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Vista lateral de um simulador do túnel de vento e o equipamento foi desenvolvido para produzir um fluxo de ar contínuo e similar a um motor a jato atuando sobre o sistema de desaceleração (FAA2, 2018).

Também, recomenda-se excluir completamente a especificação e o uso, a qualquer momento, de materiais inflamáveis e antifaiscantes que provoquem ou agravem o risco de incêndio, de materiais que emitam vapores tóxicos e fétidos em um ambiente de incêndio, de materiais que possam causar interferências visuais ou a qualquer equipamento de auxílio à navegação e materiais que atraiam a fauna local ou permitam condições para o crescimento de plantas. (INFRAERO,2020).

3.4 – Procedimentos construtivos

Neste item, destaca-se a apresentação dos procedimentos construtivos disponíveis no mercado para o sistema de desaceleração EMAS, assim como, a identificação da sequência construtiva e de aplicação dos materiais que integram os dois sistemas certificados pela FAA, o EMAS (atual EMASMAX) e o greenEMAS, que são fabricados pela Runway Safety e o sistema certificado pela CAAC, o LANZU-1, que é fabricado pela HangkeEnterprises.

3.4.1 – Sistema de desaceleração EMASMAX

Primeiramente, durante a montagem, é fixado um escudo defletor na parte frontal do sistema para proteção contra objetos projetados na decolagem, os blocos são industrializados, personalizados e dispostos no local seguindo uma modelagem de altura para ajuste das inclinações e tem resistência à compressão de acordo com as especificações. A Figura 5 exemplifica a sequência de fabricação de um bloco EMASMAX que recebe um revestimento resistente e uma camada separadora em espuma na parte superior, tela de nylon estruturante nas laterais e base do bloco e na parte inferior é fixada uma bandeja com encaixes para facilitar o transporte e o manuseio durante a instalação.

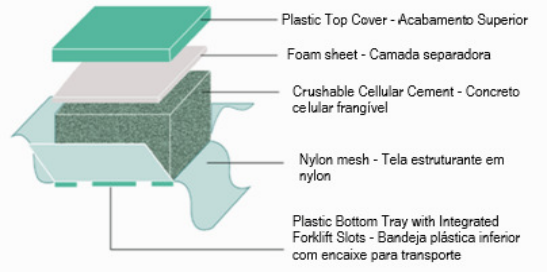


Figura5 –A ilustração apresenta o croqui detalhado das diversas camadas de um bloco do sistema *EMASMAX* (Adaptado de RUNWAY, 2022).

3.4.2 – Sistema de desaceleração greenEMAS

Este sistema é produzido no local, porém o agregado leve é fabricado com base em vidro reciclado, transportado e estocado no canteiro antes da execução da obra, e ao ser finalizado, o sistema tem a aparência de uma base monolítica com todas as laterais inclinadas, no entanto, este sistema contempla uma sucessão de camadas que incluio agregado leve compactado (*Foam Glass*), a laje de cobertura (*CLSM*), com a função de confinar o agregado, e o revestimento superior (*Topcoat*), conforme indicado na Figura 6.

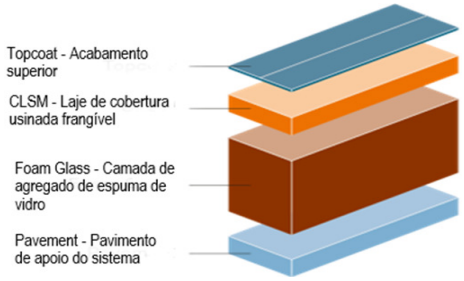


Figura 6 - A ilustração mostra materiais que compõem as diversas camadas de um sistema *greenEMAS* (Adaptado de RUNWAY, 2022).

3.4.3 – Sistema de desaceleração LANZU-1

Os blocos do sistema de desaceleração LANZU-1 têm similaridade nos requisitos de especificação, características técnicas e procedimento construtivo com os blocos do sistema EMASMAX. A Figura 7 exemplifica a sequência de fabricação do bloco que recebe um revestimento superior resistente e na parte inferior é fixada uma bandeja com encaixes para facilitar o transporte e o manuseio durante a instalação. A CAAC e a CAST realizaram testes de cargas de roda única, protótipos em tamanho real, resistência à penetração, entre outros, para atender exigências mecânicas e de permeabilidade, e garantir as diretrizes e normas internacionais, assim cumprindo os parâmetros de projeto, segurança e durabilidade.

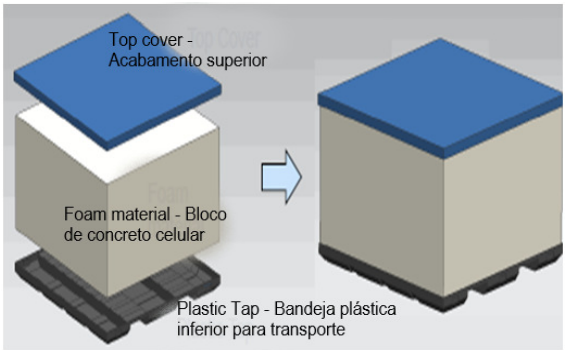


Figura 7 – A figura apresenta os materiais que compõem as camadas do bloco do sistema de desaceleração LANZU-1 (Adaptado - Fonte: Andrea González – TECNIGRAL, 2017).

3.5 – Estudo de caso

Para a fluidez de compreensão, a apresentação do estudo de caso divide-se em três casos reais de ultrapassagem de final de pista (*overrun*) em que, coincidentemente, todos compartilham do mesmo sistema de desaceleração, o EMASMAX, além de apresentar informações concentradas na Tabela 4 e nos relatos de cada aeroporto. Essas informações foram baseadas nas entrevistas e na pesquisa dos sites AIRNAV (dados de pouso e decolagem) e NTSB (investigação dos acidentes), nas circunstâncias de implantação, nas dimensões, nas inspeções periódicas, nos valores (construção e recuperação) e na funcionalidade do sistema, incluindo as condições locais e climáticas que também são referências para a análise de risco após os incidentes.

Tabela 4 – Dados referentes aos incidentes do Estudo de Caso – Entrevistas e NTSB 1 e 2

Dados	Reading - RDG	Bob Hope – BUR	Charles Wheeler - MKC
Quantidade de pistas	2	2	2
Numeração	13 / 31 e 18 / 36	8 / 26 e 15 / 33	1 / 19 e 3 / 21
Cabeceira c/ sistema *EMAS*	31	26	1 e 19
Área do sistema *EMAS* (m²)	4.026	5.527	8.685
Valor da construção (US$)	6.500.000	9.000.000	23.000.000
Cabeceira do acidente	31	26	1
Valor recuperação (US$)	1.332.715	1.098.000	410.000
Área de recuperação (m²) - bloco ~122x122 cm	464	Não informado	115
Valor recuperação (US$) / m²	2.870	Não informado	3.577
Suspensão total das operações	Não informado	37 minutos	5 horas e 47 minutos
Fechamento da pista (horas)	60	12,5	14,5
Danos à aeronave	Danos no trem de pouso e içamento da aeronave	Danos nos motores, trocadores de calor, ventiladores e sondas	Danos secundários
Condições de aproximação	Visibilidade boa - 10 milhas (16.093m), temperatura de 24ºC e velocidade do vento de 5 nós (9,27km/h) - NTSB 1	Precipitação de média a forte, visibilidade = 2.415m, temperatura = 8ºC, vento de popa = 20km/h e aumento de 12,96km/h no pouso - NTSB 2	Relato de previsão de tempo fechado e 30% de precisão de chuvisco. Não há boletim de acidentes na NSTB
Condições da pista	Seca e com depósitos de borracha	Pista molhada (contaminada), relato de frenagem boa em pousos anteriores	Pista tratada com anticongelante e sem problemas com pousos e decolagens
Liberação completa da pista	28 dias	Canceladas as decolagens na cabeceira 26 até a recuperação do *EMAS*	Canceladas as decolagens na cabeceira 1 até a recuperação do *EMAS*
OBS:	O piloto entrou alto e insistiu no pouso	Velocidade de aproximação mais alta que a normal	-

3.5.1 – Aeroporto 1 – Reading - RDG

Nas respostas da entrevista, o Sr. Tempesco comentou que uma das alternativas para cumprir os parâmetros de segurança contidos na circular da FAA, seria de encurtar permanentemente a extensão da pista 13/31, mas a opção pelo sistema EMASMAX, mesmo que tenha um custo alto para a sua implantação, permitiria conservar extensão inicial e utilizável da pista. O incidente ocorreu no dia 21 de julho de 2021, conforme mostra a Figura 8, em torno das 16h, e foram adotadas medidas para comunicação do incidente aos órgãos competentes.

Figura 8 - Aeronave aguardando guindaste para içamento, pois sofreu avarias no trem de pouso (Cortesia: Sr. ZackaryTempesco).

O sistema foi projetado para uma vida útil de 20 anos, viabilizado financeiramente por um subsídio federal no ano de 2007, incluindo o fornecimento de todos os materiais e a mão de obra especializada para execução dos serviços.

3.5.2 – Aeroporto 2 – Bob Hope - BUR

Nas respostas da entrevista, o Sr. Henderson comentou que não havia opções viáveis, pois, utilizar uma tecnologia alternativa não estaria em conformidade com a política comercial americana para que as agências federais comprem materiais e produtos domésticos, para a aquisição e importação de componente de vidro. O incidente ocorreu no dia 6 de dezembro de 2018, conforme mostra a Figura 9, em torno das 9h e 5 minutos, sem relato de feridos e o avião sofreu danos básicos.

Figura 9 - Aeronave parada na extensão lateral do sistema de desaceleração e pode-se notar houve uma alteração na rota durante a operação de pouso (NTSB2, 2022).

3.5.3 – Aeroporto 3 – Charles Wheeler - MKC

Nas respostas da entrevista, o Sr. Freeman esclarece que havia alternativas além do sistema EMASMAX e em última análise decidiu-se pelo sistema de desaceleração por ser a melhor opção de segurança pelo espaço disponível e que não conseguiria acomodar as dimensões padronizadas de uma área de segurança (RSA). Adotou-se a vida útil de projeto de 20 anos, durante a implantação do sistema houve impactos nas operações, como em qualquer projeto de construção, pois as pistas foram significativamente encurtadas e as aeronaves com maior capacidade não puderam operar durante esse período de transição e as inspeções são realizadas periodicamente.

Figura 10 – Visão frontal do sistema de desaceleração e o resultado da ação do trem de pouso da aeronave sobre o sistema (Cortesia: Sr. Adam Freeman).

O incidente ocorreu em 24 de fevereiro de 2019, às 4h e 28 minutos, conforme a Figura 10, a aeronave Embraer Phenom 100 sofreu danos secundários e o tripulante a bordo não se feriu.

3.5.4 – Avaliação de Risco – ACPR Report 50

Para a elaboração da Tabela 8, sobre a avaliação de risco, utilizou-se uma estrutura com base nos eventos retratados no estudo de caso e nas informações contidas na Tabela 4. O relatório ACRP REPORT 50, Apêndice F (ICAO, 2011), trata de modelos para a avaliação de risco em áreas de segurança de pista, previsto na regulamentação da FAA, e tem por objetivo principal desenvolver condições e ferramentas para auxiliar os planejadores de aeroportos na elaboração de uma avaliação confiável.

Nesta avaliação de risco, a caracterização de cada evento *overrun* é composta pela aferição quantitativa das operações no período entre a implantação do sistema de desaceleração e o incidente com base na observação de uma gravidade, indicada na Tabela 6 que classifica tanto os danos às aeronaves quanto as lesões corporais, ou seja, as condições indesejáveis de um evento tipo *overrun*, e de uma probabilidade de ocorrência, indicada na Tabela 7, que descreve o evento de acordo com a frequência de operações de um determinado aeroporto.

Após a elaboração dos cálculos, considera-se o cenário mais desfavorável com base nas condições de gravidade e probabilidade, para representar o contexto estudado e adota-se a classificação de risco que se enquadra no evento conforme as combinações da Tabela 5.

Tabela 5 – Matriz de Risco para classificação de risco dos incidentes (Adaptado de *ICAO*, 2011)

Gravidade / Probabilidade	Mínimo 1	Menor 2	Maior 3	Perigoso 4	Catastrófico 5
Frequente A	1A	2A	3A	4A	5A
Provável B	1B	2B	3B	4B	5B
Remoto C	1C	2C	3C	4C	5C
Extremamente Remoto D	1D	2D	3D	4D	5D
Extremamente Improvável E	1E	2E	3E	4E	*

Risco Alto
Risco Médio
Risco Baixo

* Inaceitável com ponto único e/ou falhas de causa

Tabela 6 – Critérios de gradação de gravidade dos incidentes (Adaptado de *ICAO*, 2011)

Mínimo - 1	Menor - 2	Maior - 3	Perigoso - 4	Catastrófico - 5
- Nenhum dano à aeronave, mas ferimentos mínimos ou desconforto de pouca importância para o(s) passageiro(s) ou trabalhadores.	- Danos mínimos à aeronave; - Pequenos ferimentos aos passageiros; - Limitações mínimas não planejadas das operações aeroportuárias (ou seja, fechamento de pistas de táxi); - Incidente menor envolvendo o uso de procedimentos de emergência do aeroporto.	- Danos graves à aeronave e/ou ferimentos leves ao(s) passageiro(s) / trabalhador(es); - Grandes interrupções não planejadas nas operações do aeroporto; - Incidente grave; - Dedução na capacidade do aeroporto para lidar com condições adversas.	- Danos graves à aeronave e/ou ferimentos graves ao(s) passageiros(s) /trabalhador(es); - Fechamento total e não planejado do aeroporto; - Principais limitações de operações não planejadas (ou seja, fechamento de pista); - Grandes danos do aeroporto a equipamentos e instalações.	- Perda total da aeronave e/ou instalações ou lesão fatal em passageiro(s)/ trabalhador(es); - Fechamento não planejado completo do aeroporto e destruição de instalações críticas; - Instalações e equipamentos do aeroporto destruídos.

Tabela 7 – Critérios de gradação da probabilidade dos incidentes (Adaptado de *ICAO*, 2011)

	Quantitativo		Qualitativo	
	Geral	**Específico doAeroporto**	**Por Instalação**	**NAS - Amplo**
Frequente - A	A probabilidade de ocorrência por operação é igual ou superior a $1x10^{-3}$	Espera-se que ocorra mais de uma vez/semana ou cada 2.500 partidas ($4x10^{-4}$), o que ocorrer primeiro	Espera-se que ocorra mais de uma vez por semana	Espera-se que ocorra a cada 1-2 dias
Provável - B	A probabilidade de ocorrência por operação é menor que $1x10^{-3}$, mas igual ou maior que $1x10^{-5}$	Espera-se que ocorra cerca de uma vez por mês ou 250.000 partidas ($4x10^{-6}$), o que ocorrer primeiro	Espera-se que ocorra cerca de uma vez por mês	Espera-se que ocorra várias vezes por mês
Remoto - C	A probabilidade de ocorrência por operação é menor que $1x10^{-5}$, mas igual ou maior que $1x10^{-7}$	Espera-se que ocorra cerca de uma vez por ano ou 2,5 milhões de partidas ($4x10^{-7}$), o que ocorrer primeiro	Esperado ocorrer cerca de uma vez a cada 1-10 anos	Espera-se que ocorra cerca de uma vez a cada poucos meses
Extremamente Remoto - D	A probabilidade de ocorrência por operação é menor que $1x10^{-7}$, mas igual ou maior que $1x10^{-9}$	Espera-se que ocorra uma vez a cada 10-100 anos ou 25 milhões de partidas ($4x10^{-8}$), o que ocorrer primeiro	Espera-se que ocorra cerca de uma vez a cada 10-100 anos	Espera-se que ocorra cerca de uma vez a cada 3 anos
Extremamente Improvável - E	A probabilidade de ocorrência por operação é inferior a $1x10^{-9}$	Espera-se que ocorra menos do que a cada 100 anos	Espera-se que ocorra menos de uma vez a cada 100 anos	Espera-se que ocorra menos de uma vez a cada 30 anos

Tabela 8 – Matriz para avaliação de risco das operações do Estudo de Caso

Avaliação dos Critério de Risco - *FAA - ACRP Report 50*										
Considerações / Aeroporto	1	2	3	4	5	6	7	Gravidade - Tabela 6	Probabilidade - Tabela 7	Matriz de Risco - Tabela 5
Reading **2009-2021** Data do incidente - 21/07/2021	11	365	202	4217	81	341.577	2,93E-06	Adotada gravidade "Maior 3" - dano grave ao trem de pouso e içamento da aeronave, e grande interrupção não planejada	Opções - **a)** Geral - Remoto C : probabilidade de ocorrência entre $1x10^{-5}$ até $1x10^{-7}$ ou **b)** Por instalação - Extremamente Remoto D: probabilidade entre 10 e 100 anos	Risco Médio - 3 (Tab 6 - gravidade "Maior - 3") e C (Tab 7 - probabilidade "Geral - Remoto C"), portanto **RM = 3C** (Tab 5)
Bob Hope - Burbank **2002-2017** Data do incidente - 02/04/2017	14	365	91	5201	386	2.007.586	4,98E-07	Não considerado - incluso para informar que houve um incidente anterior ao estudo de caso deste aeroporto e por isso a coluna 1 (2017 - 2018) = 0		
2017-2018 Data do incidente - 06/12/2018	1	365	248	613	386	236.618	4,23E-06	Adotada gravidade "Maior 3" - dano aos motores e equipamentos, e grande interrupção não planejada	Opções - **a)** Geral - Remoto C : probabilidade de ocorrência entre $1x10^{-5}$ até $1x10^{-7}$ ou **b)** Geral - Remoto C : probabilidade entre 1 e 10 anos	Risco Médio - 3 (Tab 6 - gravidade "Maior - 3") e C (Tab 7 - probabilidade "Geral - Remoto C"), portanto **RM = 3C** (Tab 5)
Charles B. Wheeler **2009-2019** Data do incidente - 24/02/2019	9	365	55	3340	350	1.169.000	8,55E-07	Adotada gravidade "Maior 3" - grande interrupção não planejada e danos secundários a aeronave	Opções - **a)** Geral - Remoto C : probabilidade de ocorrência entre $1x10^{-5}$ até $1x10^{-7}$ ou **b)** Geral - Remoto C : probabilidade entre 1 e 10 anos	Risco Médio - 3 (Tab 6 - gravidade "Maior - 3") e C (Tab 7 - probabilidade "Geral - Remoto C"), portanto **RM = 3C** (Tab 5)

Colunas	Considerações
1	Contagem de anos inteiros de operação
2	Quantidade de dias (ano)
3	Complemento de dias contados até a data do incidente, excluindo os anos inteiros
4	Soma total dos dias - coluna 4 = (coluna 1 x coluna 2) + coluna 3
5	Quantidade de operações diárias, dados AIRNAV 1 e 2 (Reading e Bob Hope) e Sr. Adam Freeman
6	Quantidade de operações realizadas do início das operação do *EMAS* até a data do incidente
7	Quantidade de incidente dividido por quantidade de operações - coluna 7 = (1 / coluna 6)

4. CONCLUSÕES

No contexto de segurança de final de pista com objetivo de reduzir os impactos de um evento *overrun*, constatou-se que a implantação do sistema de desaceleração EMAS oferece benefícios de segurança previsíveis e eficazes. Essa alegação tem base nas condicionantes construtivas e funcionais expostas neste estudo, e evidenciou-se na análise da avaliação de risco

da Tabela 8, que apresentou um resultado de Risco Médio = "3C", quanto aos critérios de probabilidade de ocorrência e de gravidade de um evento.

Observou-se que, até o momento, não há ensaios para medir a eficiência do sistema de desaceleração EMAS ao longo do tempo e que o sistema de desaceleração greenEMAS utiliza os parâmetros de projeto validado pela FAA para atender as determinações solicitadas por autoridades internacionais, mas não foram realizados testes com aeronaves em escala real para o sistema greenEMAS.

Analisando a funcionalidade do sistema EMAS, podemos verificar a eficácia na capacidade de desaceleração e parada de uma aeronave de modo seguro e confiável, além de mitigar as consequências de um evento.

Entretanto, em que pese à necessidade de continuidade de implantação deste sistema de desaceleração seguro, os aeroportos devem garantir as condições para a realização das vistorias contínuas do sistema, disponibilizar condições, métodos e cenários para o treinamento de operadores e tripulantes tanto na ação durante uma eventual ultrapassagem de final de pista quanto na conscientização dos pilotos dos benefícios oferecidos pelo sistema em caso de *overrun.*

5. REFERÊNCIAS

AIRNAV1 – **KRDG – Reading Regional Airport / Carl A. Spaatz Field** – Reading – Pennsylvania – USA Disponível em: http://www.airnav.com/airport/KRDG - Acessoem: 01 ago. 2022.

AIRNAV2 –**KBUR Bob Hope Airport** – Burbank – Califórnia - USA - Disponível em: http://www.airnav.com/airport/KBUR - Acesso em: 31 jul. 2022.

AIRNAV3 – **KMKC Charles B. Wheeler Downtown Airport**– Kansas City – Missouri – USA - Disponível em: http://www.airnav.com/airport/KMKC - Acesso em: 01 ago. 2022.

ANAC – BRASIL. Ministério da Infraestrutura.– **Projeto de aeródromos - RBAC nº 154** – Emenda nº 07. Brasília, DF: Ministério da Infraestrutura, 2021. 238p - Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-154/@@display-file/arquivo_norma/RBAC154EMD07%20-%20retificado.pdf. – Acesso em: 01 maio 2022.

FAA1 - U.S. DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL AVIATION ADMISTRATION - 150/5220-22B - Engineered Materials Arresting Systems (EMAS) for Aircraft Overruns – Washington – DC – 27 set 2012 – Disponível em: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5220-22 - Acesso em: 25 mar. 2022.

FAA2 – U.S. DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION - FEDERAL AVIATION ADMISTRATION - **DOT/FAA/TC-18/18 – Development of engineered materials arresting systems from 1994 through 2003** – Washington – DC - maio 2018 – Disponível em: http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tc18-18.pdf - Acesso em: 03 set. 2022.

FAA3 – U.S. DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION -FEDERAL AVIATION ADMISTRATION **– Engineered material arresting system (EMAS)** – Washington – DC – 30 mar. 2022 – Disponível em: https://www.faa.gov/newsroom/engineered-material-arresting-system-emas-0 - Acesso em: 01 abr. 2022.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION – **Improved models for risk assessment of runway safety areas ACPR REPORT 50** – 2011 –Disponível em: https://www.icao.int/SAM/Documents/2011/AGAASEROSTUDIES/ACRP%2004-08%2050-Draft%20Final%20Report.pdf- Acesso em: 25 jun. 2022.

INFRAERO – BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - **Edital e seus anexos técnicos**. Brasília, DF: Ministério da Infraestrutura, 2020 - Disponível em: https://licitacao.infraero.gov.br/portal_licitacao/servlet/DetalheLicitacao?idLicitacao=162643 - Acesso em: abr. 2022.

NTSB1 – USA – NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD – **Project Summary: Aviation Investigation – 7 Docket Items – ERA21LA296** – Washington - DC – 21 jul. 2021 –Disponível em: https://data.ntsb.gov/Docket?ProjectID=103526– Acesso em: 03 jun. 2022.

NTSB2 - USA – NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD – **Project Summary: Aviation Investigation – 28 Docket Items – DCA19IA036** – Washington - DC – 06 dez. 2018 –Disponível em: https://data.ntsb.gov/Docket?ProjectID=98737– Acesso em: 03 jun. 2022.

RUNWAY – **RUNWAY SAFE GROUP** - Disponível em:https://runwaysafe.com/solutions/the-emas-offers/ - Acesso em: abr. 2022.

TECNIGRAL – Blog, Transportes. **Tecnología *EMAS* de última generación**. Madrid, Espanha, 2017 - Disponível em: https://www.tecnigral.es/tecnologia-emas/ - Acesso em: 30 jun. 2022.

SMALL AIRPORT PROJECT MANAGEMENT AND INNOVATION: A SCOPING REVIEW

Rômulo de Azevedo Gomes*, Mauro Caetano
Aeronautics Institute of Technology (ITA), Air Transport Laboratory (LabTar), São José dos Campos/SP.

*** Corresponding author e-mail address**: romulo.gomes@ga.ita.br

PAPER ID: SIT2188

ABSTRACT

This study aims to provide a literature synthesis of what has been studied in the context of small airports, emphasizing topics such as airport project management and innovation to subsidize a future conceptual model for small airport project management based on innovation principles. Also, this paper is the first step of a major project that seeks to identify the capability of innovation in small airports. To this end, a scoping review of the literature, with elements of a comprehensive search, has resulted in a list of peer-reviewed papers showing the main lines of study about these infrastructures. The search using the descriptor "small airport" and synonyms through databases like ScienceDirect, Scopus, and Web of Science returned a universe of 3.746 unique studies for possible investigation in the last ten years. The present study shows the initial findings of an ongoing holistic evaluation of 1.186 documents with the potential to be included in the final review. Despite the significant number of papers that deal with each theme separately, a much smaller number deal with them together. Hence, the scoping review is the most appropriate methodology to verify opportunities, support the conceptual model mentioned above and future studies on the subject.

Keywords: Air transport, Building Information Modelling, Infrastructure, Technology.

ACKNOWLEDGMENTS

National Council for Scientific and Technological Development (CNPQ) and National Secretariat of Civil Aviation (SAC).

2. INTRODUCTION

The effects on the economy and social development given the presence of small airports, also known as catalytic impact, although recognized, are challenging to measure (Halpern & Bråthen, 2011) but continue to be investigated (Pot & Koster, 2022; Zhang & Xie, 2023).

In fact, not only the social and connectivity importance of small airports should be considered, as they can face challenges that can be even greater than traditional airports that have sufficient revenues to fund themselves or attract new operations (Červinka, 2017; Kazda, Hromádka & Mrekaj, 2017). Thus, the optimization of the resources involved becomes a prominent factor. Therefore, there are research lines in the literature that try to verify the efficiency of small airports (Gutiérrez & Lozano, 2016; Chutiphongdech & Vongsaroj, 2022), while others analyze the subsidies they receive (Wu & Qi, 2021). Also, the more there is a deepening in the context of these airports, the more lines emerge, such as those related to environmental issues (Harley, Timmis & Budd, 2020).

The examples above show that, over time, studies on the same subtopic, in this case, small airports, end up being segmented into several lines of research, and the vision of the whole may be lost since fragmentation can bring difficulties in synthesizing what has been questioned or already answered about a particular subject. At this point, a literature review indicating the main lines related to a specific theme and their gaps can be helpful. This is supported by a growing interest in research on small airports, and this subtheme could still be a potential focus of study. (Oliveira, Lohmann & Oliveira, 2022)

In addition, other lines can be detected with the revision, and other gaps can be highlighted. One may be concerning innovation, which has been pointed out as less pronounced in small airports, but the reasons need to be better investigated (Halpern, Mwesiumo, Suau-Sanchez, Budd & Bråthen, 2021).

To clarify, there is no consensus on an accurate and unique definition of what a “small airport” would be. It varies according to the context in which it is inserted. Even countries like Brazil, which, since 2015, have had a legal definition that considers an airport as regional if the annual passenger movement is less than 800.000 passengers per year for the Legal Amazon region or 600.000 pax/year for other regions (Silva, Granemann, Guarnieri & Da Silva, 2022), is still susceptible to debate. Harley et al. (2020), for example, adopt the number of five million passengers per year, in line with the documentation referenced by Karagkouni & Dimitriou (2022) of the European Parliamentary Research Service (EPRS). Furthermore, other requirements are mentioned, such as not being in capitals, covering point-to-point routes, and short and medium distances. ICAO (2016) also has its classification that divides airports into light, medium, and heavy, based on the number of aircraft movements. Although it is not a classification created with this debate in mind, it can serve as a basis for questioning whether the aerodrome operates as a regional airport. Another example is Bristol Airport, considered a busy regional airport (Risby, Guest, & Warnock-Smith, 2022), showing that the discussion of the characteristics of these airports can be expanded. Therefore, the recommendation is that the evaluation takes place on a case-by-case basis, aligned with the objectives of each research.

Product, process, organizational, and marketing innovations are mentioned in the literature (Whang, Chang & Lee, 2023). The last three can occur in small airports. Making a parallel between small companies and small airports, they could implement innovations under certain circumstances despite their financial limitations (Saka, Chan & Wuni, 2022). A practical example would be the implementation of Building Information Modelling (BIM) in some Brazilian small airport projects as a mandatory process. Given its relationship with project management methods (Peterson, Hartmann, Fruchter & Fischer, 2011), it can also be thought about how project management works in these infrastructures.

However, it is understood that, before dealing with innovation or project management in small airports, a previous step must be taken:

to know, through the literature, which elements have already received attention and which ones can still be explored.

Thus, this research aims to provide a literature review identifying what has been discussed about small airports and possible existing gaps, with a particular interest in innovation and project management, providing subsidies for future research.

The article was structured as follows: Section 2 presents the methodology in use and what stage the study is at. Section 3 brings some results and discussions based on the sample already analyzed and a first draft of the conceptual model of project management in small airports. Finally, Section 4 brings initial impressions of the results and possible directions.

3. METHODOLOGY

The paper consists of a scoping literature review (Munn et al., 2018) regarding small airports combined with project management and innovation. Such a review is adequate when one is not looking for an answer to a precise question but by mapping characteristics or concepts on a given topic, becoming aware of possible gaps, or even indicating the need for a systematic review. Another advantage of the scoping review is that it is inherently "systematic-like"; it also requires a rigorous approach in terms of protocols and methodological documentation while allowing more flexibility than a systematic review.

Furthermore, a comprehensive strategy in the literature search allows greater sensitivity in defining keywords through an iterative process, in which findings become subsidies for including new words (Ward, Stevens, Brentnall & Briddon, 2008). For example, small airports can appear as small, regional, remote, or rural (Baker & Donnet, 2012). Thus, if the search strategy does not include this feedback dynamism, this type of variation would most likely not be detected, leading to a bias in the search. Three significant databases were used: ScienceDirect, Scopus, and Web of Science (WoS). They concentrate the leading journals related to air transport. Furthermore, a database with complete texts like ScienceDirect also allows searching the full text, revealing the presence of chosen descriptors even if they are not in the abstract.

The fields considered for inclusion or exclusion of a paper were the title and abstract. The checklist followed the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR) (Tricco et al., 2018), which allows a more significant number of studies to be evaluated. For example, if at least one of the descriptors, "project management" or "innovation", combined with the descriptor "airport" are present in the abstract, the study was evaluated. Only peer-reviewed articles will be included in the study, this being the quality criterion. Its indexing in the databases partially guarantees this. Given the possibility of exceptions, a quick check was made for the papers cited in this study.

A combination of descriptors was used to conduct the review, as shown in Figure 1.

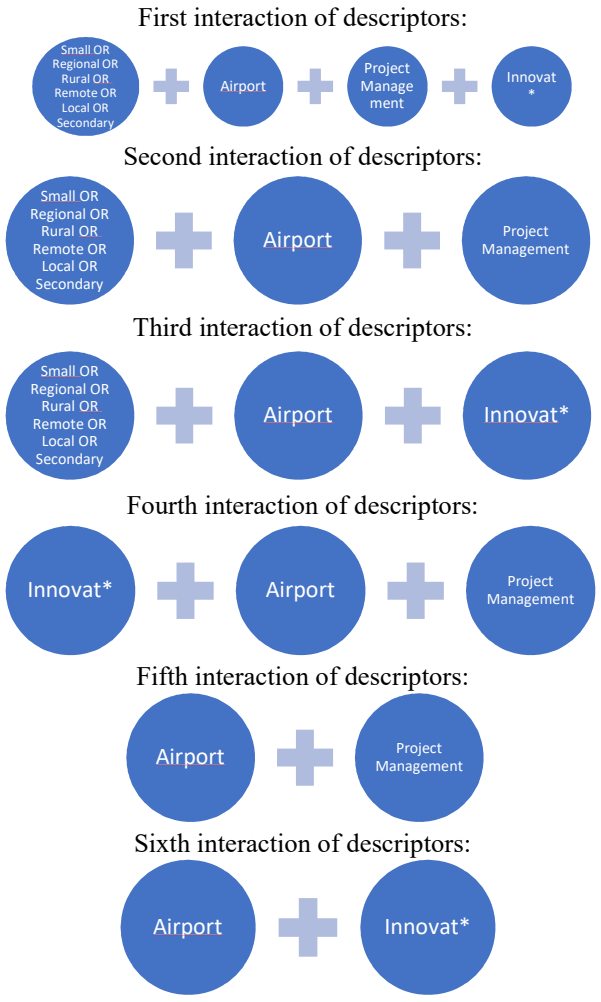


Figure 1 Combination of descriptors. Source: Authors.

According to Figure 1, the descriptors small, regional, rural, and remote, all followed by the descriptor airport, were combined with project management or innovation. The search strategy varies slightly according to the database, as different search engines have their specificities. A simple search was used in both WoS and Scopus, considering all fields. For a first contact with the topic, any prior limitations were avoided. The only exceptions were the combinations "airport" AND "project management" and “airport” AND “innovation”, which were limited to the title, abstract, and keywords fields to better direct the results. It should be noted that this limitation was only used in keywords considered supplementary.

After that, a filter was applied to limit the documents to articles and reviews. Conference papers, early access, or mini reviews were also considered, taking advantage of the source flexibility allowed by the scoping reviews. Additionally, conference papers may contain studies in progress like this. They were included to have a broader overview of lines of research initiated and prospect the topic for a more targeted review. Articles cited in the selected papers, when assessed as relevant, may also be used. Specifically for the case of ScienceDirect, truncation is not enabled in the database, so, after analysis, the descriptor innovat* was replaced by “innovation” or “innovative” to lead to approximately equivalent results among databases.

The other possibility is the combination of “innovation” AND “airport”, but a recent systematic review supports this search strategy. (Kiliç, Ucler & Martin-Domingo, 2021). Therefore, only papers from 2020 onwards were prospected in this case, although the overall article count includes all entries. Emphasis will be given only if the papers deal with small airports or innovations adaptable to small airports.

To ensure contemporaneity, the last ten years were considered, that is, 2012 to 2022 (Paré, Trudel, Jaana & Kitsiou, 2015). In addition, the results include papers from January to August 2023. Thus, until the moment, 2.695 papers were minimally evaluated, focusing on title and abstract. Of these, 1.185 were chosen for closer evaluation. As this is ongoing and relatively complex research, given the need for analogies among distinct and fragmented themes, the detailed review of each paper is still in progress, limiting citations to those completed. Thus, the final count may vary until completion, as the search is comprehensive. Some older articles may be cited, but only for contextualization, and are not part of the results.

To reduce bias, desirable in scope reviews, some procedures were followed. One of them is the evaluation of abstracts without checking the authors and journal of origin. This allowed only the content to be focused, with the quality assessment being made only in the next step. This avoids a tendency to consider journals that have the highest metrics. As a language requirement, only articles with abstracts in English were evaluated.

Before the quality assessment, the inclusion/exclusion criteria were defined, which was done comprehensively. Around 20% of the database was evaluated. From the initial keyword search, which necessarily included “small” and similar terms, due to the relatively low number of articles specific to small airports, the scope was expanded. Thus, the inclusion criteria were as follows:

Articles that contained the theme of innovation, technologies, or project management in related areas such as infrastructure projects or buildings. It is imagined that some of the case studies presented, with due investigation, could be transferred to the theme of small airports. In the case of spillovers, they were generally disregarded unless the analogy for use in small airports in the project phase was clear. For example, BIM is a field with many studies in recent years. BIM articles that mention its interface with projects were included, while those that deal exclusively with implementing BIM in organizations, which would be a previous step, were excluded. The same reasoning is used for purely methodological papers or in the case of the public-private partnership (PPP) contracting format without relation to the project phase. However, it is recognized that this may have an impact on the way the project unfolds.

Also, possible identical articles with different Digital Object Identifier (DOI) or the same abstract were evaluated for similarity, being eliminated if they had the same content. In the case of a paper published at a conference and later published in a Journal, the Journal article prevails.

As an initial contact with the topic, automated computational tools were avoided, except for spreadsheets and reference organizers. After the complete evaluation, such tools will be considered in the results synthesis stage.

4. RESULTS

The search, with the descriptors “small”, “regional”, “rural”, “remote”, “local,”, and secondary combined with airports, project management, and innovation, leads to the quantities shown in Table 1.

Table 1 Search results

Descriptor 1	*Descriptor 2*	*Descriptor 3*	*Paper count*
Small Airport	Innovat*	Project management	10
Regional Airport			43
Rural Airport			0
Remote Airport			0
Local Airport			8
Secondary Airport			5
Small Airport	Innovat*	-	493
RegionalAirport			923
Rural Airport			13
Remote Airport			77
Local Airport			291
Secondary Airport			313
Small Airport	-	Project Management	12
Regional Airport			58
Rural Airport			0
Remote Airport			0
Local Airport			10
Secondary Airport			6
Airport	Innovat*	Project Management	2442
Airport	-	Project Management	798
Airport	Innovat*	-	2366
Total			7868

The results in Table 1 demonstrate the papers returned by the databases before filtering, that is, with their duplicates. The third column shows how many articles were initially returned.

In general, when looking at the specific descriptors of small airports (rural, remote, regional, etc.), there is a small number of papers, considering there will be duplicates or eliminated papers after the evaluation. In this case, as a scoping review and considering that some project management practices can be adapted for smaller projects, the other approach was to exclude the airport's size in the descriptors. This leads to 5511 unique articles, which, after the 10-year time limitation, as explained in Section 2, leads to the 3.746 that are part of the evaluation. Until the completion of this paper, 2.695 were evaluated based on the title and abstract, resulting in 1.186 pre-selected, and a sample was chosen for more detailed evaluation, quality checking, and development of this article. Since this is research in progress, the numbers may vary in the end.

The articles that have the keywords of most significant interest like "small", "regional", "rural", "local", "remote" and "secondary" correspond to only 2.262 articles, that is, around 28.7% of the total sample of 7.868 articles. Of these 2,262, the vast majority (2110) was combined with the word “innovation”. This number would be even smaller if the search were restricted to the title, abstracts, and keywords fields, similar to what was done with the complementary keywords (those combined with just "airport"). Therefore, ignoring what is also being applied at larger airports would probably bring bias to the research. Thus, the option of adding combinations with the word "airport", without "small" and synonyms sought to verify whether design practices and innovations present in these larger airports could somehow be brought to the reality of small airports.

After these considerations, the articles were grouped and carefully checked for duplicates. This includes mandatory reading of the abstract and checking the DOI before making any exclusion decision.

Only a few of these papers can be effectively considered as dealing specifically

with small airports related to innovation and project management. Taking, for example, the term “small airport”, a system of radar sensors is proposed for very small airports or private runways that can detect aircraft and pedestrians within a specific range, seeking safety in operations, with low cost as one of the advantages (Martelli et al., 2016). The proposed innovation uses the WiFi network, so an insight would be to consider using mobile networks in the future to reduce their cost further.

Still, in technologies in small airports, there is the development of a new method for monitoring defects on runways, using a more automated approach instead of manual measurements (Kovačič, Doler & Sever, 2021). The experiment was carried out at a regional airport in Slovenia. However, it is noted that the method can be used on other runways and is therefore adaptable to other types of infrastructures that require the same type of measurements.

The cost issue seems to be essential for small airports. Remencová & Sedláčková (2021) investigated self-service technologies in check-in areas using kiosks and that, although acquisition and maintenance costs are high for the reality of a regional airport, the investment can cost around five times less than remaining with traditional check-in methods. Despite the possible variations, it is an effort to relate the benefits of a possible digital transformation in airports of this size.

Another approach is the adaptation of existing systems at larger airports, such as, for example, the Airport Collaborative Decision Making (ACDM). For small airports, the so-called ACDM Lite is proposed (Schultz, Rosenow & Olive, 2019). Although the maintenance and implementation value of the 16 ACDM milestones is unfeasible for small airports, its simplified design can meet 8 of these milestones using public data from automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B). In some cases, the need to implement ACDM Lite goes beyond the airport's individual needs, which, given its simplicity, does not require the system, but on improving the management of the whole airport network at an acceptable cost.

These initiatives show there is potential for small airports to become potential environments for developing new technologies. Its low movement, with larger operational windows and structures that often resemble some components of larger airports, allow for initial testing of products that can later be applied to larger airports.

Another point of interest in the literature is Urban Air Mobility (UAM). Although some articles were not selected due to the exclusion criteria, as they deal exclusively with aspects related to aircraft or routes, the issue of vertiports and small airports may be a topic. Thinking about the scale of these airports and the cost aspect, the implementation of vertipads can also be an alternative, as it is the smallest infrastructure mentioned in the literature (Brunelli, Ditta, & Postorino, 2023b), but other alternatives, such as vertihubs cannot be ruled out. The three differ in terms of the number of simultaneous aircraft. Targeted research in ScienceDirect with the descriptor vertiport returns, in the last three years returned 86 results, including reviews and articles, which shows that much effort has been demanded on the topic. Brunelli et al (2023b) bring a literature review based on design, capacity, and location. However, it is difficult to establish a standard size for these infrastructures as they depend on critical aircraft, and several configurations are still under development, with the Federal Aviation Administration (FAA) itself saying that the Advisory Circular (AC) will be defined in the future.

Another point is the limited range considered for the electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL) (Ribeiro, Borille, Caetano & Silva, 2023; Brunelli et al., 2023b), indicating that not all regional airports could be used. In this case, the study by Ribeiro et al. (2023), which verifies the potential for using existing aerodromes and heliports in the State of São Paulo, Brazil, as potential infrastructures to receive these aircraft, can be used as a basis for eventual research considering the associated implementation or adaptation costs and checking the willingness to pay of the managers of these aerodromes through possible layouts and identifying the acceptance based on the price and reality of

each airport. It is understood that these requirements of minimum spaces and elements are necessary for a correct cost estimate. However, it would be a possible path while the definitive dimensions of the vertiports are still under study. This approach already finds support in specific UAM literature, but in other contexts, such as demand forecasting for airport shuttles in the Italian context (Brunelli, Ditta, & Postorino, 2023a)

Given the limitations of specific studies in small airports, this project was carried out through analogies with related areas. This approach is not new in the literature. When verifying environmental practices in a population of 441 Small European airports and the factors that lead to adopting these practices, Harley et al. (2020) use analogies with small organizations. Similarly, the investigation of environmental issues at small Canadian airports considers small airports as Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) (Boiral, Ebrahimi, Kuyken & Talbot, 2019), making this type of practice feasible under a careful approach. This type of analogy requires empirical confirmation to verify in the field which factors are applicable or not, something that both articles do. Based on this kind of analogy, Figure 2 presents the current word cloud of the pre-selected articles:

Figure 2 Word Cloud of pre-selected papers. Source: Authors.

Figure 2 was created using the articles' keywords with the exclusion of descriptors such as "project" or "airport", since these words, which were part of the search strategy, distorted the cloud. The treatment also included the removal of words such as country names. Thus, it is noted that terms related to construction and design appear the most, followed by decision-making, sustainable development, risk management, and life cycle. Also, on a smaller but relevant count, megaprojects and costs.

Based on the most frequently occurring keywords up to this stage of the study, the future conceptual model for small airport projects will be developed around the concepts presented in Figure 3:

Figure 3 Initially proposed conceptual model Source: Authors.

As shown in Figure 3, the central theme is the design of small airports. Around it gravitate concepts such as BIM, Lean Construction, sustainability, and Agile methodologies, as well as good practices in megaprojects and risk management. As the detailed analysis of the articles progresses, new insights can be added or concepts merged. In this model, there are still no hierarchies and interdependencies, but the objective is that, in the end, the best project management and innovation practices are brought into the model.

BIM seems to be a trend. Seventy-eight articles, or around 6% of the pre-selected papers, present the topic in their keywords. Of these, around 61.5% in the last five years.

Some are combined with other concepts, such as lean construction, including real applications at Istanbul Airport. (Michalski, Głodziński & Böde, 2022). It can be seen from the paper that, in terms of equipment, tablets were used to monitor the work in connection with the model, thus providing insights into the application of this practice in a small airport project. BIM and Lean Construction seem to be a topic of investigation already since, in the literature, there is a suggestion of using the two combined to remove inefficiencies in small constructions (Eivindson, Innvær, Kolberg, Merschbrock & Rolfsen, 2017). Furthermore, there is the integration of lean BIM and sustainability through a systematic literature review (Moradi & Sormunen, 2023).

Agile practices have also been studied in the management of transport projects (Šimíčková, Buganová & Mošková, 2021). In the argumentation, there was a mention of regional airport projects, with the understanding that the study was also consistent with this reality. Two of the ten main risks identified in project management in companies were: lacking in risk management and in the project itself. However, factors such as deficiencies in training or support from senior management, which can be understood as directly related to the first two deficiencies, are also on the list, thus increasing the number of challenges related to management. The authors also point out that even simpler projects present elements of risk. After the qualitative evaluation of four agile methodologies, Scrum, Kanban, ScrumBan, and Extreme Programming, they concluded that the first three could be used in the context of transport projects, with an emphasis on ScrumBan.

The issue of sustainability in small airports has already been discussed previously in this study, but here, it is worth clarifying that not only environmental aspects are part of this term. When thinking about sustainability dimensions, two more can be highlighted in addition to the environmental one: social dimension and economic dimension (Sreenath, Sudhakar & Yusop, 2021). The social dimension includes noise management, employee development, and community investment, while the economic dimension is the sum of direct, indirect, catalytic, and induced impacts by the presence of the airport. Also included in this dimension are the passenger experience, airport safety, and security. The Triple Bottom line (TBL) or 3P (people, planet, profit) concept used in the construction of the previously mentioned article means that these other aspects should be considered, that is, an approach that goes beyond pure and straightforward financial performance (Hammer, & Pivo, 2017; Sreenath, et al., 2021).

TBL maintains a close relationship with Integrated project delivery (IPD), which focuses on the integration of people, business structures, systems, and practices to improve the results of a project through a collaborative process in all its stages of execution (Karasu, Aaltonen & Haapasalo, 2023).

Finally, good management and innovation practices in megaprojects and complex projects can be used to support the conceptual model. Despite the massive difference in scale, some principles are common to small airport projects. For example, Ashkanani & Franzoi (2023), in search for gaps in the literature on the topic of megaprojects management systems, classified the results into nine clusters:

1. Project planning and control;
2. Conceptualization and execution strategies;
3. Organizational structure and project governance;
4. Safety, health and environment;
5. Cost and schedule;
6. Risk analysis and management;
7. Procurement process,
8. Stakeholder alignment, engagement, and satisfaction;
9. Project closeout.

These are the same design steps followed at a small airport. It is worth remembering that despite the term "small", these infrastructures have their complexity, mainly because they combine different engineering specialties, including different specializations for airside and landside. Therefore, even if only some of the elements contained in these stages apply to a regional airport's reality, it is worth investigating what can or cannot be brought to simpler realities.

5. CONCLUSIONS

The objective of this paper was a general presentation of the progress of the project and a broad overview of what has been researched regarding small airports, with greater detail on topics such as innovation and project management, establishing a basis for research on derived topics such as the capability of innovation of small airports.

The prospected articles could be more extensive in terms of scope when compared to what has been researched at larger airports regarding innovation and project management. Despite the descriptors being focused on these topics, the results returned only allow the construction of reasoning with analogies, making research on innovation in small airports a complex issue. The most significant difficulty is given by the financial limitations of these infrastructures. This need for adaptation suggests that the most appropriate approach to the problem, in addition to the final scoping review, is the segmentation of themes in systematic reviews and field research to obtain an answer from the point of view of the managers of these airports.

As mentioned, this is ongoing research in which several points for improvement have already been identified, and this refinement will allow the proposition of the conceptual model of project management with innovation principles in small airports.

6. REFERENCES

Ashkanani, S., & Franzoi, R. (2023),
Gaps in megaproject management system literature: a systematic overview, Engineering, Construction and Architectural Management, 30(3), 1300-1318. doi: https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2021-1113.

Baker, D., & Donnet, T. (2012).
Regional and remote airports under stress in Australia,
Research in Transportation Business & Management, 4, 37-43. doi: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.06.011.

Boiral, O., Ebrahimi, M., Kuyken, K., & Talbot, D. (2019). Greening Remote SMEs: The Case of Small Regional Airports. Journal of Business Ethics, 154, 813–827. doi: https://doi.org/10.1007/s10551-017-3447-0.

Brunelli, M., Ditta, C. C., Postorino, M. N. (2023a)
SP surveys to estimate Airport Shuttle demand in an Urban Air Mobility context, Transport Policy, 141, 129-139. doi: https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.07.019.

Brunelli, M., Ditta, C. C., Postorino, M.N. (2023b)
New infrastructures for Urban Air Mobility systems: A systematic review on vertiport location and capacity,
Journal of Air Transport Management, 112, 102460. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102460.

Červinka, M. (2017).
Small regional airport performance and Low cost carrier operations, Transportation Research Procedia, 28, 51-58. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.168.

Chutiphongdech, T., & Vongsaroj, R. (2022).
Technical efficiency and productivity change analysis: A case study of the regional and local airports in Thailand,
Case Studies on Transport Policy, 10(2), 870-890. doi: https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.03.001

Eivindson E., Innvær, B. E., Kolberg E., Merschbrock, C., Rolfsen, C. N. (2017).
Inefficiencies in Norwegian Small-scale Construction, or the Problem of too Long Trucks? Procedia Engineering, 196, 543-549. doi: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.028.

Gutiérrez, E., & Lozano, S. (2016).
Efficiency assessment and output maximization possibilities of European small and medium sized airports,
Research in Transportation Economics, 56, 3-14. doi: https://doi.org/10.1016/j.retrec.2016.07.001.

Halpern, N., & Bråthen, S. (2011).
Impact of airports on regional accessibility and social development.
Journal of Transport Geography, 19(6), 1145-1154. doi: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2010.11.006.

Halpern, N., Mwesiumo, D., Suau-Sanchez, P., Budd, T., & Bråthen, S. (2021).

Ready for digital transformation? The effect of organisational readiness, innovation, airport size and ownership on digital change at airports.
Journal of Air Transport Management, 90, 101949. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101949.
Hammer, J., & Pivo, G. (2017). The Triple Bottom Line and Sustainable Economic Development Theory and Practice. Economic Development Quarterly, 31(1), 25–36. doi: https://doi.org/10.1177/0891242416674808.
Harley, G., Timmis, A., & Budd, L. (2020). Factors affecting environmental practice adoption at small European airports: An investigation, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 88, 102572. doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102572.
ICAO (2016). ICAO Annex 14 Aerodromes: Volume I—Aerodrome Design and Operations. International Standards and Recommended Practices. Montréal, QC, Canada: International Civil Aviation Organization
Karagkouni, A., & Dimitriou, D. (2022). Sustainability Performance Appraisal for Airports Serving Tourist Islands. Sustainability, 14(20), 13363. doi: https://doi.org/10.3390/su142013363.
Karasu, T., Aaltonen, K., & Haapasalo, H. (2023). The interplay of IPD and BIM: a systematic literature review. Construction Innovation, 23(3), 640-664. doi: https://doi.org/10.1108/CI-07-2021-0134.
Kazda, A., Hromádka, M., & Mrekaj, B. (2017). Small regional airports operation: unnecessary burdens or key to regional development, Transportation Research Procedia, 28, 59-68. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.169.
Kiliç, S., Ucler, C., & Martin-Domingo, L. (2021). Innovation at airports: a systematic literature review (2000–2019). Aviation (Vilnius, Lithuania), 25(3), 220-231. doi: https://doi.org/10.3846/aviation.2021.14917
Kovačič, B., Doler, D., Sever, D. (2021) The Innovative Model of Runway Sustainable Management on Smaller Regional Airports. Sustainability, 13, 652. doi: https://doi.org/10.3390/su13020652.
Martelli, T., Bongioanni, C., Colone, F., Lombardo, P., Testa, L. & Meta, A. (2016). Security enhancement in small private airports through active and passive radar sensors. 2016 17th International Radar Symposium (IRS) (pp. 1-5). Poland: Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi: 10.1109/IRS.2016.7497360.
Michalski, A., Głodziński, E., Böde, K. (2022). Lean construction management techniques and BIM technology – systematic literature review. Procedia Computer Science, 196, 1036-1043. doi: https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.107.
Moradi, S., & Sormunen, P. (2023). Integrating lean construction with BIM and sustainability: a comparative study of challenges, enablers, techniques, and benefits. Construction Innovation, ahead-of-print, ahead-of-print. doi: https://doi.org/10.1108/CI-02-2023-0023.
Munn, Z., Peters, M. D. J., Stern, C., Tufanaru, C, McArthur A., & Aromataris, E. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. BMC Medical Research Methodology, 18, 143. doi: https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x.
Oliveira, R. P., Lohmann, G., & Oliveira, A. V. M. (2022). A systematic review of the literature on air transport networks (1973-2021). Journal of Air Transport Management, 103, 102248. doi: https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102248.
Paré, G., Trudel, M., Jaana, M., Kitsiou, S. (2015). Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews, Information & Management, 52(2), 2015, 183-199. doi: https://doi.org/10.1016/j.im.2014.08.008.
Peterson, F., Hartmann, T., Fruchter R., & Fischer, M. (2011) Teaching construction project management with BIM support: Experience and lessons learned, Automation in Construction, 20(2), 115-125. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.009.
Pot, F. J., & Koster, S. (2022).

Small airports: Runways to regional economic growth? Journal of Transport Geography, 98, 103262. doi: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103262.

Ribeiro, J. K., Borille, G. M. R, Caetano, M., Silva, E. J. (2023).
Repurposing urban air mobility infrastructure for sustainable transportation in metropolitan cities: A case study of vertiports in São Paulo, Brazil, Sustainable Cities and Society, 98, 104797, doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104797.

Remencová, T., Sedláčková, A. N. (2021). Modernization of Digital Technologies at Regional Airports and its Potential Impact on the Cost Reduction, Transportation Research Procedia, 55, 18-25. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.06.003.

Risby, J. Guest, S., Warnock-Smith, D. (2022). A critical analysis of Bristol Airport's employee surface access habits: Developing strategic recommendations for reducing private vehicle usage. Research in Transportation Business & Management, 43, 100700. doi: https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100700.

Saka, A. B., Chan, D. W. M., & Wuni, I. Y. (2022).
Knowledge-based decision support for BIM adoption by small and medium-sized enterprises in developing economies, Automation in Construction, 141, 104407. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104407.

Schultz, M., Rosenow, J., Olive, X. (2019). A-CDM Lite: Situation Awareness and Decisionmaking for Small Airports based on ADS-B Data. 9th SESAR Innovation Days: Inspiring Long-Term Research in the Field of Air Traffic Management, SIDs 2019. Greece. Retrieved Sep 23, from: https://hal.science/hal-02623883.

Silva, C. M., Granemann, S. R., Guarnieri, P., Da Silva, G. L. (2022). Measuring the Attractiveness of Cities to Receive Investments in Regional Airport Infrastructure. Mathematics, 10, 1734. doi: https://doi.org/10.3390/math10101734.

Šimíčková, J., Buganová K., & Mošková E. (2021).
Specifics of the Agile Approach and Methods in Project Management and its Use in Transport. Transportation Research Procedia, 55, 1436-1443. doi: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.130.

Sreenath, S., Sudhakar, K., Yusop, A. F. (2021)
Sustainability at airports: Technologies and best practices from ASEAN countries. Journal of Environmental Management, 299, 113639. doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113639.

Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun H., Levac, D. … Straus, S. E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. Annals of internal medicine, 169(7), 467–473. doi: https://doi.org/10.7326/M18-0850.

Whang, J., Chang, W., Lee, J. (2023).
Interactive and synergistic relationships among different types of innovations. Journal of Retailing and Consumer Services, 74, 103422. doi: https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2023.103422.

Ward, R., Stevens, C., Brentnall, P., & Briddon, J. (2008).
The attitudes of health care staff to information technology: a comprehensive review of the research literature. Health Information & Libraries Journal, 25, 81-97. doi: https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2008.00777.x.

Wu, D., & Qi, H. (2021).
Evaluating the economic and ecological impact for small and medium airport subsidies in China,
Journal of Cleaner Production, 281, 124811. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124811.

Zhang, H., Xie T. (2023).
A key to urban economic growth or an unnecessary burden? Opening airports in small and medium-sized cities, Cities, 133, 104105. doi: https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104105.

Towards Optimized Airport Site Selection with Geometric analysis

Vitor Silva Carvalho de Lyra, Evandro José da Silva
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Civil

*** Corresponding author e-mail address**: vitor.lyra@ga.ita.br

PAPER ID: SIT2246

ABSTRACT

The optimal siting of airports plays a crucial role in ensuring efficient and safe air transportation systems. This paper aims to address the problem of airport site selection by incorporating geometric considerations and a methodology called MESA - *Metodologia de Escolha de Sítios Aeroportuários* (in Portuguese, Airport Site Selection Methodology)[1]. Specifically, the study brings a novel approach to this matter, focusing on the automation of the airport site selection process through the implementation of Python routines coupled with Geographic Information System (GIS) capabilities. These routines are designed to assess obstacles, altimetric variations, and land use incompatibilities, applying criteria such as Search Region (SR), Topography Irregularity (TOP), Excluded Areas (EXC), Avoiding Areas (AVD) and Approximation Surface Violations (AIR), based on ICA 11-408. By considering these factors, the proposed approach aims to identify suitable airport locations that meet regulatory requirements and optimize operational efficiency. This paper focuses on the computational aspects of the methods, by improving computational time of the several criteria checks. The validation of the method in real-world scenarios is left as next step of our research.

Keywords: Optimization, Geometry, Airports, Site Selection, GIS.

ACKNOWLEGDEMENTS

I would like to express my heartfelt gratitude to my parents for their unwavering support and encouragement throughout my academic journey. Their love and belief in me have been my constant source of inspiration. I am also thankful to the Almighty for granting me the strength and determination to pursue my research. Furthermore, I extend my appreciation to ITAEx for their generous financial support, which has played a crucial role in the successful completion of this scientific endeavor. Your assistance has been instrumental in turning this research into a reality, and I am sincerely thankful for your contributions.

1. INTRODUCTION

The selection of appropriate airport sites is a complex decision-making process that involves various technical and regulatory considerations. Geometric factors, such as the initial search region, topography, unfeasible areas, and proximity to surrounding obstacles and communities significantly impact the overall suitability of an airport site.

This paper introduces a Python-based methodology designed to tackle the challenge of optimizing airport site selection by effectively integrating these critical geometric factors. The methodology is built upon the robust framework of MESA (Alves, et al., 2020) and places a primary emphasis on the site identification phase, rather than the subsequent site ranking process. Site identification involves assigning a preliminary site geometry to a geographic position, specifying its orientation, and evaluating it for potential infeasibilities. Figure 1 depicts the identification process, that divides the Search Region (SR) into subareas where sites are assigned to. Subsequently, every preliminary site undergoes refinements and optimizations, guided by various disciplines such as drainage and airspace protection.

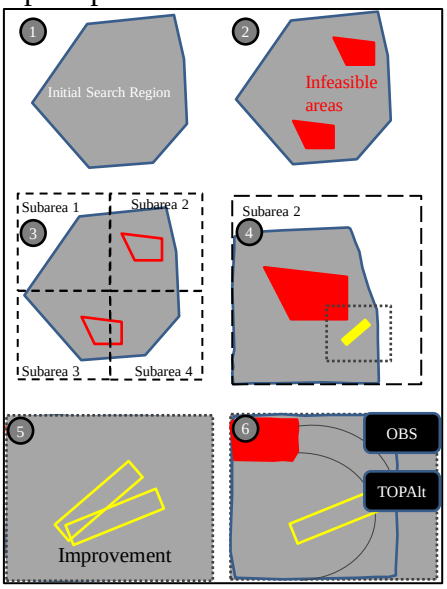


Figure 1 – Identification of areas.
Source: Adapted from (SAC, 2021).

In the context of MESA's framework (Alves, et al., 2020), the process of site identification heavily depends on manual trials conducted by analysts, an approach that can diminish the quality of identified candidate sites and introduce potential subjective biases.

The herein proposed method aims to address these challenges by automating and streamlining the site selection process. Its primary goal is to expedite decision-making and enhance the overall quality of candidate site identification. Unlike manual searches, this method can explore a wider range of options efficiently. By generating a list of potential sites based on the integrated analysis of various geometric factors, the code serves as a valuable tool for specialists to evaluate and refine their choices, ultimately optimizing the airport site selection process.

The following sections encompass key components of this study. Firstly, a concise literature review is provided, offering context and insights into existing research. Subsequently, we delve into the methodology employed in this study, including a comprehensive presentation of the code's framework. Lastly, we present the results, featuring an in-depth analysis of the computational efficiency of the code's operational processes.

2. BACKGROUND

While the primary focus of this study centers on optimizing airport siting, it is essential to contextualize it within the broader framework of optimal facility siting. As such, this discussion aims to offer a comprehensive perspective on the matter, providing valuable insights into various facility siting methodologies.

In a study conducted by Tercan(2021), a detailed analysis of land suitability for wind farms in Balıkesir province, Turkey, is presented. Employing a GIS-Best Worst Method approach, this study seeks to identify optimal wind farm locations while considering a range of assessment criteria and constraints. The Best-Worst Method (BWM) is utilized to determine assessment criteria weights, with a Geographic Information System (GIS) employed for data analysis. Nine assessment criteria and nineteen constraints are incorporated, with wind velocity identified as the most significant assessment criterion, followed by land cover/use, proximity to

specific conservation zones, urban settlements, slope, wetlands, important bird zones, and others. Pairwise comparisons of assessment criteria are conducted by six experts using a 1-9 scale, and criteria weights are derived from the experts' averaged results. It's worth noting that this study employed a GIS to create a thematic map with spatial data layers representing the criteria. This map served as a basis for the land suitability assessment conducted by the experts. Importantly, the study did not involve automation in site identification.

In a related context, Atici, Simsek, Ulucan, and Tosun (2015) present a GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) approach for the site selection of wind power plants. Their objective is to establish a structured procedure for identifying the most suitable locations for wind power plants in Western Turkey. The methodology involves creating data layers through a Geographic Information System (GIS), applying exclusion criteria and constraints, and ranking the remaining land areas based on multiple criteria, including wind speed, distance to transmission lines, and land use. The authors also discuss the limitations of their approach, such as the absence of information regarding land ownership, and suggest further research directions. Similarly to Tercan (2021), this study utilized a GIS to generate a map with layers representing the relevant factors and criteria, allowing for the identification of optimal areas. It's noteworthy that automation was not employed, and the assessment involved a visual analysis of the generated map.

Eskandari *et al.* (2015) introduce a novel method for landfill siting, aiming to simplify the process by leveraging available land evaluation maps. This method comprises two stages: initially, preliminary landfill siting criteria are derived from a land classification map; subsequently, these criteria are standardized and weighted to generate a landfill siting suitability map. The methodology is demonstrated through the selection of a suitable landfill site near Marvdasht, Iran. The article also highlights the advantages of this new approach over traditional landfill siting methods and references other pertinent studies, offering valuable insights into optimizing landfill site selection using land classification maps. In terms of geometric analysis, the research considers various factors, including the topography and residential areas of the region, as well as the proximity of the landfill's location to roads, rivers, and historical sites.

Within the realm of solar power plants, Mokarram *et al.* (2020) present a methodology for selecting suitable sites for solar farms using GIS-MCDA techniques, applied to a case study in the southeast of Fars province, Iran. This methodology comprises several steps, including the preparation of thematic layers with 30 m spatial resolution, homogenization of each layer using fuzzy logic, overlaying layers via AHP and ANP techniques, and employing a feature selection algorithm. The authors also briefly discuss the use of the Inverse Distance Weighting (IDW) method. The study takes into consideration factors such as distance to roads, residential areas, topography, and climatic features for the geometric assessment of solar farm site suitability.

A spatial multicriteria analysis for solar farms is also explored by Prieto-Amparán *et al.* (2021) in the Desert of Chihuahua, Mexico. The methodology considers factors such as land slope, aspect, wind speed, soil texture, and landforms. Employing GIS technology, spatial databases are generated for each criterion, and eight restriction rules are defined to exclude non-suitable areas. The study effectively identifies various levels of site suitability, evaluating two scenarios for assigning weights to the criteria: the ranking method and the Analytical Hierarchy Process (AHP). Remarkably, the geometric analysis conducted in this study closely resembles that of Mokarram *et al.* (2020), with similar criteria taken into account. The study's methodology reveals a lack of automation in the site selection process.

In a distinct domain, Damoom, Hashim, Aljohani, Saleh, and Xoubi (2019) employ a GIS-based multi-criteria decision-making approach to identify potential areas for Nuclear Power Plant (NPP) siting in Saudi Arabia. This study encompasses three major phases: the selection of exclusionary criteria, the creation

of individual dataset maps for each exclusionary criterion, and sensitivity analyses considering NPP size (footprint) and sea-level rise. The paper elaborates on the specific exclusionary criteria used, including slope, fault lines, and flood risk, and presents detailed maps of suitable NPP siting areas along the western and eastern coasts of Saudi Arabia. Furthermore, the study involves the generation of buffers to represent the influence zone of residential areas and evaluates the distances to hazardous facilities, water flows, protected lands and historical sites as part of the geometric assessment process.

In this manner, our exploration of the literature has facilitated a comprehensive examination of diverse methodologies related to facility allocation, encompassing solar farms, landfills, and nuclear power plants. However, it is evident that, despite the multifaceted efforts to enhance the efficiency of facility selection processes, the automation of this pivotal procedure remains relatively understudied. As a result, we anticipate that this investigation will make a significant contribution to advancing this field, which appears to have received insufficient attention in the past.

3. METHODOLOGY

The proposed method for optimal airport site selection relies on a Python-based code that incorporates multiple raster files for analysis. The code operates upon an objective function with previously established weights and considers different geometric factors for site selection.

a) INPUT DATA

The code requires the following input data:

Raster files: Each assessment criterion requires a separate raster file. The raster files used for Topography Irregularity (TOP) and Airspace (AIR) criteria contain elevation data, while the raster files used for Search Region (SR), Avoiding Areas (AVD), and Exclusion Areas (EXC) criteria are binary files indicating the viability of each pixel in the study area.

Excel file: The criteria thresholds and other parameters are provided in an Excel file, allowing for straight documentation of the project. This file contains the location of all necessary files and how they must be read. It also contains the initial guess for the site's location, the site's shape and the code's running time limit.

b) CRITERIA

This section contains a description of the 5 criteria used to evaluate a site's availability.

Each criterion consists of a set of procedures that check the feasibility of a given airport site concerning a specific geometric factor.

The algorithm iteratively searches for site alternatives guided by a solution update rule and constraint logic checkers.

- **SEARCH REGION (SR)**: The raster file representing the search region (SR) is used to check if the site is allocated to a valid region.
- **Topography Irregularity (TOP)**: The raster file containing elevation data (DEM) is used to evaluate the topography in the physical area of the site according to an elevation amplitude threshold.
- **Avoiding Areas (AVD)**: The input raster file indicates which pixels should be avoided due to environmental, legal, or logistical constraints. The code checks if the percentage of areas to be avoided in the current site is greater than the established threshold. Two layers are used for greater flexibility: for instance, the tolerance for forest cover can be set to 20%, whereas the tolerance for wetlands can be set to 5%. As spatial data can be noisy and airport sites use extensive land, the AVD criterion can be very beneficial to the search process.
- **Exclusion Areas (EXC)**: The raster file indicates which pixels must be avoided due to environmental, legal, or logistical constraints. The code checks if there is any pixel that is not viable within the current site boundaries.

- **Airspace (AIR)**: The airspace criterion is evaluated using the elevation data from the DEM raster file. The code assesses the presence of obstacles in the surroundings of the site based on the approximation surface defined on ICA 11-408. Depending on the input data, this analysis can consider not only natural terrain but also factors such as towers, buildings, and other artificial obstacles.

c) CODE'S FRAMEWORK

Upon data ingestion, the code initiates a loop that commences with the initial guess provided by the user and proceeds to evaluate the aforementioned criteria. Subsequently, if the most recently examined site satisfies the conditions, the code will proceed to investigate another location based on the previous one.

Conversely, if the previous site fails to meet the acceptance criteria, the code will stochastically select an alternative location within the defined Search Region. This iterative process continues until the code exhausts its allocated time limit, as determined by the user.

It is important to emphasize that a specific execution sequence is undertaken, meaning the criteria are not checked simultaneously. While one optimization avenue could involve identifying the most efficient sequence for the criteria checking, it's worth noting that this study did not delve into that aspect.

Nonetheless, the sequence definition does follow a logical rule, prioritizing the evaluation of simpler criteria before more intricate ones. Additionally, to maximize the code's efficiency, the TOP and EXC criteria undergo a two-phase assessment:

- The first phase assesses only the points used to define the site's boundaries.
- The second phase scrutinizes all the pixels within the site's defined limits.

The sequence for the criteria evaluation during code execution is presented in Figure 2:

Figure 2: Criteria checking sequence.

In this context, the Figure 3 diagram depicts the architectural framework of the code, as explicated above.

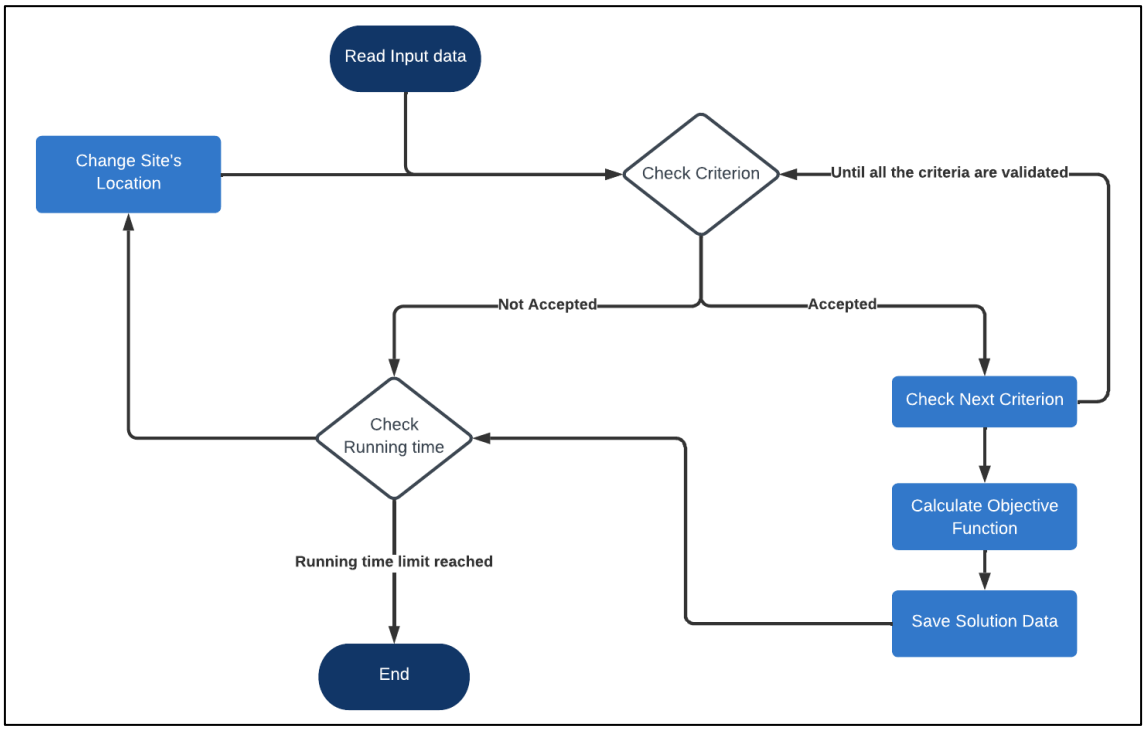


Figure 3: Code's loop framework.

d) EFFICIENCY ANALYSIS

To assess the code's efficiency, its procedures were categorized into two distinct phases:

I. **Data Extraction**: In this initial phase, the code focuses on extracting data from pixels that are imperative for the evaluation of the currently assessed site. This step is a fundamental prerequisite for the subsequent assessment within a designated criterion.

II. **Criterion Checking**: During this succeeding phase, the code engages in the procedures associated with determining the feasibility of a given airport site. Notably, this process varies for each of the previously outlined criteria.

In this manner, to evaluate the optimization of the code, real raster data from the metropolitan region of Belém served as the foundational dataset. Artificial modifications were systematically introduced into these files to assess the code's performance under diverse scenarios. These alterations were applied to the files used in the assessment of the five previously introduced criteria, with a careful balance between randomness and control, achieved through the use of specific random seeds. Illustrative examples of these artificial files can be found in Figure 4 and Figure 5.

Figure 4: Binary artificial raster file.

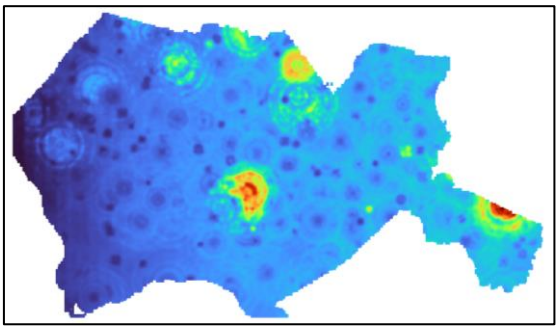


Figure 5: Topography artificial raster file.

Therefore, following the structuring of the raster file database and the delineation of the processes under scrutiny, the execution times for each criterion were meticulously calculated. The results are comprehensively presented in section 4.

4. PERFORMANCE RESULTS

4.1. Efficiency Analysis

This section presents the results obtained from the efficiency analysis of the proposed algorithms.

As explicated in item d of section 3, to assess the variability of the code, this analysis was conducted with artificial binary and topographic raster files. Thus, the results will be presented for these two scenarios.

a) Binary Raster Files

This analysis was conducted through modifications in the binary raster files of the input data.

Random seeds were used to control the modifications in the original raster file. Furthermore, in the case of binary raster files, the changes were controlled by altering the percentage of inviable regions in the files. A total of 50 artificial files were generated with the use of 10 seeds for each of the 5 different percentages of inviable regions analyzed.

I. Data Extraction

The time spent by the code in the data extraction phase for the SR criterion is presented in Figure 6.

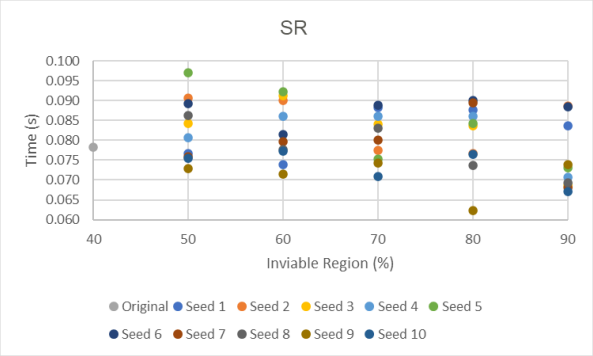


Figure 6: SR – Data Extraction Time.

Based on the graphic presented above, it becomes evident that the code's performance did not exhibit any discernible patterns concerning changes in the percentage of the inviable region or the specific seeds used. Remarkably, this pattern, or lack thereof, was consistent across all the criteria analyzed. To succinctly encapsulate these findings, Table 1 provides an overview of the average time consumed by the code for each criterion.

Table 1: Criteria Average Data Extraction Time.

Criterion	Time (s)
SR	0.080
EXC	0.057
AVD	0.000[1]
TOP	2.481
AIR	9.179

[1] The average data extraction time is computationally zero.

The results highlight a notable discrepancy in the time allocated during the data extraction phase for certain criteria, specifically those related to topographic assessments, namely TOP and AIR. These criteria clearly consumed significantly more time compared to the others.

II. Criterion Checking

The time spent by the code in the criterion checking phase for the AVD criterion is presented in Figure 7.

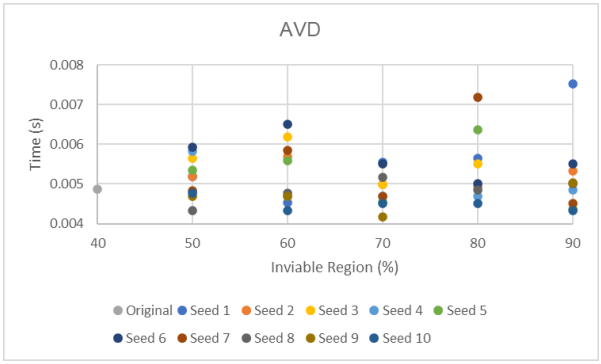


Figure 7: AVD – Criterion Checking Time.

The absence of a discernible pattern in processing time, as witnessed during the data extraction phase, persists throughout the criterion checking phase. Similar to the previous phase, the processing times exhibited no consistent trends or patterns across different criteria. The average time results are presented in Table 2.

Table 2: Criteria Average Checking Time.

Criterion	Time (s)
SR	0.000[1]
EXC	0.007
AVD	0.005
TOP	0.541
AIR	0.000[1]

[1] The average criteria checking time is computationally zero.

The processing time during the criterion checking phase consistently tends to be significantly shorter compared to the time expended in the data extraction phase. Consequently, when comparing both phases, the data extraction phase represents the primary area in need of optimization and improvement.

b) Topography Raster Files

This analysis was conducted through modifications in the topography raster files of the input data.

The controlled modifications, guided by specific seeds, involved the introduction of topographic irregularities such as valleys and mountains. This deliberated manipulation was undertaken to assess how the code responded to these scenarios. It's worth noting that the real data used in this study, derived from Belém-PA, lacked significant irregularities due to its

geographic location. As a result, these artificial modifications were essential to simulate diverse topographic conditions for a comprehensive analysis of the code's performance. A total of 4 artificial files were generated for this analysis.

I. Data Extraction

Figure 8 presents a comparison of the processing time of the TOP criterion for the 4 artificial files generated.

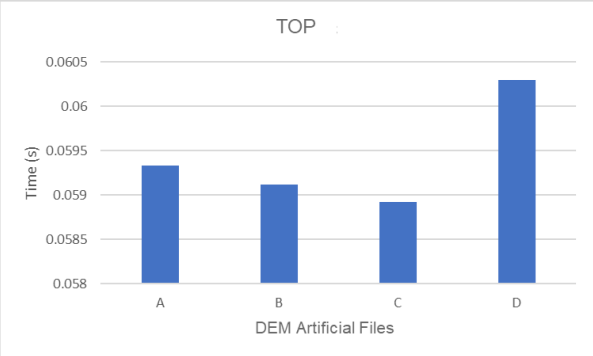


Figure 8: TOP – Data Extraction Time.

Based on the presented results, a clear conclusion emerges: there was minimal variation among the four scenarios that were subjected to analysis. The differences in processing times for the cases examined were on the order of hundredths of seconds.

II. Criterion Checking

The Figure 9 presents a comparison of the processing time of the TOP criterion for the 4 artificial files generated.

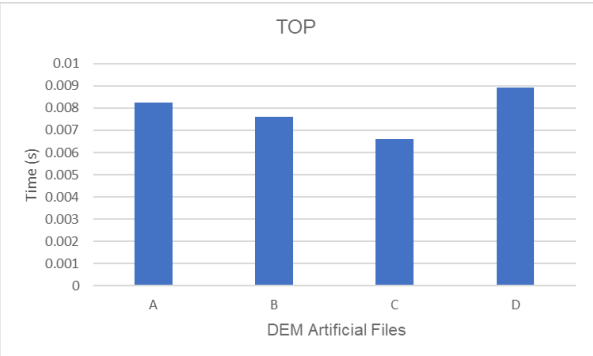


Figure 9: TOP – Criterion Checking Time.

Much like the previous phase, the analysis reveals a consistent trend: there was minimal difference observed among the four scenarios.

In light of the findings, it can be deduced that the degree of irregularities within a given search region had a negligible impact on the code's processes.

4.2. Code's Optimization

The efficiency analysis has led to the crucial insight that the processes warranting the most attention were the data extraction phases associated with the TOP and AIR criteria. As a result, specific adjustments were implemented to effectuate a reduction in the processing time. These changes encompassed the following:

1. **Data Structure Transformation**: The data structure used for storage was shifted from a *pandas dataframe* to a *numpy array*. This transformation fundamentally altered the approach to data retrieval. Instead of relying on point coordinates, the code now operates with pixels and leverages the dimensions of the raster file.
2. **Data Storage Transformation**: There was a transition from storing data in *pickle* files to *HDFStore* files, a change intended to further optimize processing speed and data handling. These files are instrumental in preserving the raster data after the initial read, allowing users the flexibility to utilize this stored data in subsequent runs of the code, if needed. This strategic shift not only enhances efficiency but also enhances the code's usability.

To consolidate the tangible benefits achieved through these two alterations, Table 3 offers a comparative analysis of the average processing time of the TOP and AIR criteria before and after the implementation of these modifications.

Table 3: Average Time Before and After Modifications.

Criterion	Time Before Modification (s)	Time After Modification (s)
TOP	2.481	0.001
AIR	9.179	2.988

5. CONCLUSIONS

In this study, the central objective centered on the automation of the airport site selection process through the utilization of a Python code, designed to identify potential site candidates. The primary thrust of the research was to evaluate the code's efficiency, with a particular emphasis on processing times associated with routines employed for criteria assessment. Consequently, strategic optimizations were implemented to reduce processing time, thereby enabling the exploration of a more extensive array of potential solutions within a predefined time frame.

Figure 10 and Figure 11 visually illustrate the significant gains achieved through these optimizations, for a fixed computer runtime. In the figures the color scheme is as follows: i. blue pixels denote feasible areas, ii. white pixels represent the unfeasible ones, iii. green rectangles denote suitable sites and iv. red rectangles indicate the unsuitable ones. The number of sites assessed markedly increased after the implementation of the optimizations. Consequently, a greater number of possible solutions were identified, enhancing the robustness of the airport site selection process.

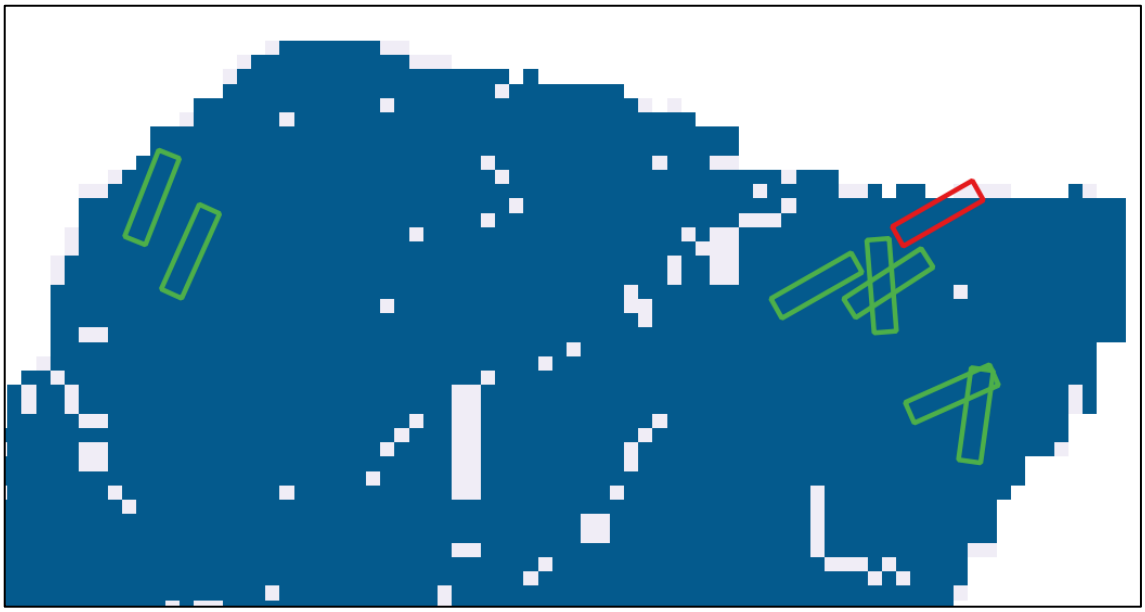


Figure 10: Sites Assessed Before Modifications.

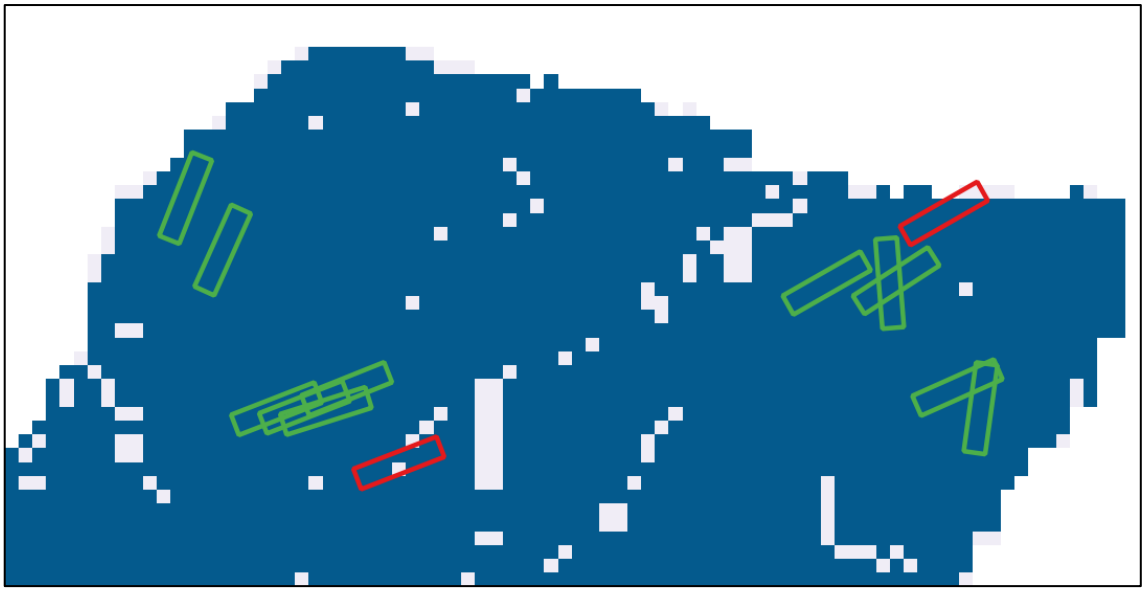


Figure 11: Sites Assessed After Modifications.

Moving forward, the next steps in this research endeavor entailing the assessment of solution quality through comparative analysis with manual methods. Furthermore, the study aims to enhance the methodology by introducing new criteria and subjecting them to evaluation by experts, drawing insights from relevant articles in the field.

6. REFERENCES

Alves, C. J., Silva, E. J., Müller, C., Borille, G. M., Guterres, M. X., Arraut, E. M., . . . dos Santos, R. J. (2020). Towards an objective decision-making framework for regional airport site selection. *Journal of Air Transport Management, 89*, 101888. doi:10.1016/j.jairtraman.2020.101888

Atici, K. B., Simsek, A. B., Ulucan, A., & Tosun, M. U. (2015). A GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis approach for wind power plant site selection. *Utilities Policy, 37*, 86-96. doi:https://doi.org/10.1016/j.jup.2015.06.001

Damoom, M. M., Hashim, S., Aljohani, M., Saleh, M., & Xoubi, N. (2019). Potential areas for nuclear power plants siting in Saudi Arabia: GIS-based multi-criteria decision making analysis. *Progress in Nuclear Energy*. doi:10.1016/J.PNUCENE.2018.09.018

Eskandari, M., Homaee, M., Mahmoodi, S., Pazira, E., & van Genuchten, M. T. (2015). Optimizing landfill site selection by using land classification maps. *Environmental Science and Pollution Research, 22*, 7754-7765. Retrieved from https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7202661

Mokarram, M., Mokarram, M. J., Gitizadeh, M., Niknam, T., & Aghaei, J. (2020). A novel optimal placing of solar farms utilizing multi-criteria decision-making (MCDA) and feature selection. *Journal of Cleaner Production, 261*, 121098. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121098

Prieto-Amparán, J. A., Pinedo-Alvarez, A., Morales-Nieto, C., Valles-Aragón, M., Álvarez-Holguín, A., & Villarreal-Guerrero, F. (2021). A Regional GIS-Assisted Multi-Criteria Evaluation of Site-Suitability for the Development of Solar Farms. *Land*. doi:10.3390/LAND10020217

SAC. (2021). *Manual de apoio à prospecção de sítios aeroportuários regionais, versão 1.0*. Brasília: National Secretariat of Civil Aviation. Retrieved from https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/transporte-aereo/manual-de-apoio-a-prospeccao-de-sitios-aeroportuarios-regionais

Silva, E. J. (2017). *Um modelo computacional para análise de conformidade de áreas e superfícies de proteção de aeródromos aos critérios da ICAO*. Ph.D. dissertation, University of São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/T.3.2017.tde-23062017-151532

Tercan, E. (2021). Land suitability assessment for wind farms through best-worst method and GIS in Balıkesir province of Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47*, 101491. doi:https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101491

AVIATION´S ENVIRONMENTAL IMPACTS

Aviation's environmental impacts study the relationship between aviation and the Environment, especially in the surroundings of airports. This technical section is most represented by female authors from the Brazilian southeast and center-west regions. More than Brazilian authors, that technical section has representation from foreign authors from Europe, Africa, and the Middle East.

his page intentionally left blank.

AIRLINES FLEETS RENEWAL FOR GLOBAL SUSTAINABILITY

H. Karam[1], E. Anwama[1], L. G. Zelaya Cruz[2], H. Alfazari[3], F. Krykhtine[4], F. Mora-Camino[1,2,5*]

[1]Durban University of Technology, DUT - South Africa
[2]Universidade Federal Fluminense, UFF – Brazil
[3]Sohar University, Sultanate of Oman
[4]Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ – Brazil
[5]Ecole Nationale de l'Aviation Civile, ENAC, France

*** Corresponding author e-mail address**: moracamino@hotmail.fr

PAPER ID: SIT2288

ABSTRACT

In this paper, the resilience of an airline in the face of huge investment needs to get an impressive reduction of carbon emissions is considered. A hard scenario is considered where new national/international regulations are introduced with an immediate quota on flights and fleet and mandatory milestone for fleet upgrade. An original fleet upgrading optimization model is developed. The economic sustainability conditions attached to such a constrained situation and the forced fleet renewal program are established and financial and operational sustainability objectives are discussed.

Keywords: Aviation sustainability, Airlines Resilience, Fleet Renewal, Dynamic Programming.

1. Introduction

This study addresses the issue of the aviation sustainability which has become an essential issue for the aviation sector which is a direct polluter of the Earth's atmosphere through its emissions of CO_2, NO_x and other particles, noise as well as the creation of contrails contributing to the greenhouse effect. More than a decade ago, apart from aeronautical noise, reducing environmental impact was not a top priority for the aeronautical sector. In the last decade, aircraft manufacturers and airlines have faced increasing pressure from governments, customers, and investors to act assertively on environmental issues and to promote and achieve sustainable environmental goals and targets. It is considered that to reach audacious sustainability objectives in the next decades, new regulations and penalties will be applied to air transport operators and then new aeronautical technologies must be introduced to maintain the activity of this sector. This will have as consequence a rather complete renewal of civil aviation fleets in the next decades. Then airlines will soon be faced with the necessity to implement heavy investment programs for the renovation of their fleets, entailing significant financial costs which in turn could lead to higher ticket prices and a contraction in demand. The survival of airlines during this apparently turbulent period could be put seriously to the test.

In this paper, the resilience of an airline in the face of such high investment needs, but also in the face of the uncertainty with respect to future operational costs and demand, is analyzed.

A long-term fleet planning period is considered for a generic airline with her initial fleet, operated network, and demand. A hard scenario where new national/international sustainability regulations are introduced with an immediate double quota policy and two milestones:

1) The double quota is relative to flights and fleets: satisfied demand and operating fleet are immediately restricted to the levels of year base 1.
2) The milestones are such that after the first one, T_L, environment non-compliant aircraft operating will be subject to a penalty and after the second milestone, T_E, such aircraft cannot be sold to another airline to be operated elsewhere.

The economic sustainability conditions attached to such a constrained situation and the forced fleet renewal program are established and financial and operational sustainability objectives are discussed.

2. Methodology

The proposed approach is based on an oriented modelling of the airline operation. This means that at this stage of the study, part of the decision space available to an airline is frozen. In that case, the structure of the supply, represented here in an original way through monthly tours to take into consideration seasonal effects on the airline performance, is considered unchanged during the whole horizon of analysis. The same is done with demand, represented by flows between connections. This results in a constant revenue through the years while ticket prices remain untouched. Then the focus in this study is on the operation of the fleet and its changing composition to face as well as possible new environmental regulations with respect to carbon emissions. The adopted scenario is an extreme one, where before considering the introduction of more performant technologies with respect to carbon emissions, the traffic volume and air transport activity are limited to their values at the base year.

The aim of the proposed model is to investigate what could be a feasible timing for the upgrading of an airline fleet in such a context with the objective of achieving a relevant reduction of carbon emissions.

3. The proposed model

Here the time horizon considered in a monthly basis is *T* (several decades), starting from time t=1 (initial situation) and *t*= t^{th} year period, *m* = 1 to 12 are month numbers.

Operations assumptions

An airline operates in year *t* *FA* aircraft between a set *A*(*t*) of $|A(t)|$ airports from a single base where the maintenance operations of its *FA* aircraft are performed.

The offer of transportation service is composed of the multiple tours realized by each aircraft of the fleet during each month of a given year. Let *TR*(*t, m*) be the set of these tours with $r \in \{1, \dots, FA\}$. A tour is composed of a sequence of elementary flights with possible repetition during the month. Let *EF*(*t, m*) be the set of elementary flights offered by the airline during month *m* of year *t* and let *NEF*(*t, m ,r, f*) the number of times that flight *f* is present in tour *r*, $r \in TR(t,m)$.

Let *LC*(*t, m, r*) the set of connections offered by the airline to its customers in month *m* of year *t* and built from the flights of tour *r* (a connection realized in a tour may be composed of one flight or a succession of flights of this tour). Then, let *LC*(*t, m, r, l*) be the set of flights building connection *l*.

Let $\pi_l(t,m)$ be the ticket price (minus airport taxes) and $D_l(t,m)$ the satisfied demand for connection $l \in LC(t,m,r)$.

Let $CA_r(t)$ be the capacity in terms of passengers (only one class of passengers is considered in this study) of aircraft *r* at period *t*, it must be such as (capacity constraint for flight *f*):

$$NEF(t,m,r,f) \cdot CA_r(t) \geq D_l(t,m) \quad l \in LC(t,m,r), r \in TR(t,m) \forall t, \forall m \quad (1)$$

4. Costs and revenues from the fleet

The revenue of the airline for year *t* retrieved from aircraft *r* is given by:

$$R_r(t) = \sum_m \sum_{l \in LC(t,m,r)} D_l(t,m) \cdot \pi_l(t,m) \quad rTR(m,t) \quad (2)$$

The revenue of the airline for year *t* is given by:

$$R(t) = \sum_{rTR(m,t)} R_r(t) \quad (3)$$

Let the cost of flight *f* operated by aircraft *r* in year *t* (it is supposed here that it remains the same during a given year month by month) be given by $C_{fr}(t,t_r)$. Here t_r is the year at which the propulsive technology of aircraft *r* has been upgraded, then if $t < t_r$ the aircraft uses the older technology, cost C_{fr}^1 and, when $t \geq t_r$, it uses the new technology with eventually smaller operating costs C_{fr}^2 while performing flight *f*.

Then the total operations cost of aircraft *r* at year *t* is given by:

$$CO_r(t) = \sum_{m=1}^{12} \sum_{f \in EF(m,t)} NEF(m,t,r,f) \cdot C_{fr}(t,t_r) \; r = 1, \cdots, FA \quad (4)$$

The total operations cost of the airline for year *t* is such that:

$$CO(t) = \sum_{r=1}^{FA(t)} CO_r(t) + COV(t) \quad (5)$$

where it is assumed that:

$$COV(t) = \varphi\big(FA(t), D(t)\big) \quad (6)$$

$\varphi(.,.)$ being an increasing function of the fleet size *FA*(*t*) and of the total number of processed passengers *D*(*t*), with:

$$D(t) = \sum_m \sum_{l \in LC(t,m,r)} D_l(t,m) \quad (7)$$

At initial situation, all the aircraft of the airline use the same propulsive technology and carbon emissions with this technology is given by:

$$CE(t) = \sum_{r=1}^{FA(t)} \sum_{m=1}^{12} \sum_{f \in EF(m,t)} NEF(m,t,r,f) \cdot CE_{fr}(t,t_r) \quad (8)$$

Here if $t < t_r$ the aircraft uses the older technology, carbon emissions CE_{fr}^1 and, when $t \geq t_r$, it uses the new technology with less carbon emissions CE_{fr}^2, while performing flight *f*.

5. Economic assumptions

A long-term inflation rate *a* over *T* is considered for the surrounding economy. According to this inflation rate, corrected ticket prices and nominal operational costs are adjusted to maintain initial value:

$$\pi_l^c(t,m) = \pi_l) \cdot (1+a)^{t-1} \quad (9)$$

and

$$C_{fr}(t,t_r) = C_{fr}^1 \cdot (1+a)^{t-1} \text{if } t < t_r \quad (10.1)$$

$$C_{fr}(t,t_r) = C_{fr}^2 \cdot (1+a)^{t-1} \text{if } t \geq t_r \quad (10.2)$$

To acquire a new aircraft, it is supposed that the airline has to make a loan to be reimbursed all

along years of operation well beyond *T*. This loan is only possible if the level of the debt of the airline is expected to remain during the repayment period less than β times its capital value (with $\beta > 0$). It is supposed that the acquisition of aircraft *r* has resulted ($t \leq T_L \wedge willresult(t > t_r)$ in a fixed financial charge $L_r(t)$ for the airline:

$$\text{if } t < t_r \text{ , } L_r(t) = L_r^1 \text{ and if } t \geq t_r \text{ ,}$$
$$L_r(t) = L_r^2 \quad (11)$$

It is supposed that shareholders of the airline receive every year a return proportional to the annual net revenue with $0 < \mu < 1$:

$$RS(t) = \mu \cdot \big(R(t) - CO(t) - L(t)\big) \quad (12)$$

At time T_L, a new legislation about carbon emissions is enforced. It is such that:

3) By T_E ($T_L \leq T_E \leq T$) airlines must have renewed their fleet so that a new technology is adopted to operate their flights with reduced carbon emissions $CE_{fr}^2$with:

$$CE_{fr}^2 < CE_{fr}^1 r \in FA(t),$$

$$f \in EF(m,t), m\{1,\cdots,12\}, t \geq T_L \quad (13)$$

4) While this objective is not achieved at T_E by tour r, the airline (and others) has to pay every year a penalty $P_r(t)$ computed by:

$$P_r(t) = max\{\alpha \cdot R_r(t), P_r^{min}\} \quad (14)$$

This expression avoids the situation in which a tour has small revenues leading to an ineffective penalty, then the penalty will be at least P_r^{min}.
Then, if $t < T_E$ the financial charge is given by:

$$L(t) = \sum_{r=1}^{FA} L_r(t) \quad (15)$$

and if $t \geq T_E$, the financial charge is given by:

$$L(t) = \sum_{r:t_r<t} L_r(t) + \sum_{r:t_r \geq t}\big(L\big|\ \big|r(t)\big|\ \big| + P_r(t)\big) \quad (16)$$

It is supposed here that the lifetime of the initial fleet of aircraft is higher than *T*, so a minimal situation is the case in which no aircraft is renewed until *T*, then at T this airline is out of operation.
The new technology is characterized by parameters (capacity, operating cost (base year 1), carbon emissions): CA_r^2, CO_{fr}^2 and CE_{fr}^2. At time t_r (with $T_L \leq t_r \leq T$) an old aircraft *r* is removed from service and a new one with enhanced environmental technology enter in operations servicing connections *LC*(1, *m*, *r*), *m* =1 to 12.

6. The optimization problem

The considered optimization problem is stated at time T_L to establish a planning of the fleet renewal during the time horizon from T_L to *T*. Here the objective can be to maximize the present value of the return to the shareholders of the airline while different constraints are considered:

$$\max_{t_r, r=1,\cdots,FA} \sum_{t=T_L}^{T} RS(t) \cdot (1+a)^{-} \quad (17)$$

with the constraints:

$$\sum_{t=T_L}^{t=T} CE(t) \leq (1 - \varepsilon/100) \cdot \sum_{t=T_L}^{t=T} \sum_{r=1}^{FA(t)} \sum_{m=1}^{12} \sum_{f \in EF(m,t)} NEF(m,t,r,f) \cdot CE_{fr}^1 \quad (18)$$

$$\sum_{\tau=T_L}^{t} (1-\mu) \cdot \big(R(\tau) - CO(\tau) - L(\tau)\big) \cdot (1+a)^{-(t-T_L)} + R_{T_L} \geq K \cdot \sum_{r=1}^{FA} L_r(t) \cdot (1+a)^{-} \quad (19)$$

$$NEF(t,m,r,f) \cdot CA_r(t) \geq D_l(t,m)$$
$$l \in LC(t,m,r), r \in TR(t,m) \forall t, \forall m \quad (20)$$

$$T_L \leq t_r \leq Tr = 1,\cdots,FA \quad (21)$$

Constraint (18) imposes that the total carbon emission is reduced by at least $\varepsilon\%duringtheconsideredperiod$. Then, R_{T_L} is the initial financial reserve of the airline, *K* is an integer and constraint (19) is a financial condition for the airline to be able to acquire new aircraft. Constraint (20) is relative to the capacity which must remain sufficient to cope with the

planned demand in all its components, finally constraint (21) implies that by time T all the aircraft of the airline fleet have been upgraded.

7. Conclusion

The first issue to be tackled using this model is the feasibility issue: what is the maximum value of ε so that this problem is feasible? It appears easily that depending of the relative importance of the penalties $P_r(t), r = 1, \cdots, FA$ with respect to the difference of financial charges between two generations of aircraft, the aircraft should be upgraded as soon as possible (T_E), or as late as possible (T). The proposed problem does not adopt a standard formulation although it is a linear integer optimization problem (decision variables: $t_r \in \{T_L, T_L + 1, \cdots, T\}$ $, r = 1, \cdots, FA$). Different heuristics based on the productivity and pollution characterizing each tour, could be designed to get with limited calculation some acceptable solutions. The proposed model could be also integrated in a multilevel optimization process where the pricing of flights and penalties to aircraft are fixed. Finally, a new version of this model could incorporate demand reactiveness to prices to allow the design of a pricing policy associated with the fleet renewal process.

References

ATAG 2021, Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century, Waypoint 2050. Edition September 2021.

Ploetner, K., Rothfeld R., Urban M., Hornung M., Tay G., and O. Oguntona, 2017. Technological and Operational Scenarios on Aircraft Fleet-Level towards ATAG and IATA 2050 Emission Targets. AIAA Aviation 2017, Denver, USA.

Turan H. H., E. Sondoss and M. J. Ryan, 2020, A long-term fleet renewal problem under uncertainty: A simulation-based optimization approach, Expert Systems with Applications, Volume 145, 1 May 2020, 113158.

Belobaba P., A. Odoni and C. Barnhart editors, 2009, The global airline industry, AIAA, John Wiley and Sons.

.

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE AEROPORTOS BRASILEIROS CONCESSIONADOS – AMPLIANDO O PARADIGMA

Maria Cecília de Farias Domingos, Rogéria de Arantes Gomes, Viviane Adriano Falcão

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Universidade Federal de Pernambuco, Coventry University

*** Corresponding author e-mail address**: mceciliadomingos@hotmail.com

PAPER ID: SIT2249

ABSTRACT

Concessions in air transport have been recurrent in Brazil, with the premise of maximizing operations and performance, bringing improvements and expansions of infrastructure. There are many studies that focus on evaluating the operational efficiency of airports, but few assess efficiency gains during the concession period and whether this change in management affects the environment. Still, there are common studies in the literature that address efficiency with variables that assess private benefits, but not the undesired effects arising from airport production. In general, efficiency is analyzed in a partial way, as all the factors involved in production are not considered. The objective of this research is to introduce the expansion of the efficiency analysis paradigm, in which the scores must be evaluated globally, with variables that can benefit and harm the system. Also, to verify how the Brazilian airports under concession have been behaving over the years, in operational and environmental terms. In this study, Data Envelopment Analysis (DEA) is applied in two ways to assess the performance of airports over the years: first in a window-form with infrastructure and demand variables, known as operational efficiency, and then with the insertion of the pollutant emission variable, known as environmental efficiency. For the use of pollutant emissions, the Principal Component Analysis (PCA) are used, which provide a set of data in a single variable. Finally, Tobit Regression is applied, to evaluate the behavior of the environmental efficiency scores in the face of external factors. The research question is whether airport concessions are, in fact, increasing the efficiency of airports, even when adding the environmental variable, which is understood to be fundamental in evaluating efficiency. It is known that, when predicting the increase in traffic demand, infrastructure expansions and consequent revenue maximization, there may be an increase in air pollution around the airport.

Keywords: Concessions, Emissions, Data Envelopment Analysis.

2. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo apresentou um aumento progressivo de demanda de passageiros e cargas, com consequentes gargalos operacionais e de infraestrutura. A busca por eficiência resultou em recorrentes concessões. O Brasil tem adotado medidas paraaumentar os níveis de eficiência operacionais e econômicos e se adequar à demanda futura de passageiros e cargas. O aumento da demanda por transporte aéreo pode causar um impacto negativo na qualidade do serviço e na relação com o meio ambiente, caso não seja acompanhado de melhorias no planejamento e na infraestrutura aeroportuária. As concessões dos aeroportos à iniciativa privada têm o objetivo de facilitar os investimentos necessários para a adequação da capacidade ao aumento do tráfego, bem como induzir novas demandas. Rolim *et al.* (2016) afirmam que aeroportos privatizados podem ser mais eficientes devido a capacidade de expansão, atração de companhias aéreas e produção de estratégias de desenvolvimento, e que são passíveis de produzir uma maior demanda por estarem vinculados à gestão mais flexível, permitindo, por exemplo, se envolver com estratégias de desenvolvimento de rotas com companhias aéreas existentes e novas.

Com o esperado aumento da demanda, os efeitos negativos também crescem, com a geração de mais ruídos e emissões de poluentes atmosféricos, por exemplo. Os modelos de eficiência atuais, que são seguidos pelas empresas privadas, incluindo as concessionárias de aeroportos, comumente levam em consideração indicadores operacionais e financeiros, e os indicadores ambientais precisam estar inclusos na análise. Por esta razão, pode-se afirmar que há modelos de eficiência atuais com abrangência parcial, pois podem partir de uma análise que não considera fatores indesejados, mas que são pertencentes e são consequência da atividade. A contribuição dessa pesquisa envolve, entre outros, ampliar o paradigma de estudos sobre eficiência, propondo a inclusão de mais um indicador, comumente negligenciado nos estudos sobre o tema. Este estudo mede a eficiência operacional e ambiental de uma amostra de 18 aeroportos concessionados brasileiros, da primeira até a quinta rodada de concessão do Governo Federal. A seleção da amostra de aeroportos justifica-se pela mudança do comportamento dos operadores que, agora privados, passariam a buscar a maximização de lucro. Neste estudo foram gerados dois modelos DEA, com indicadores operacionais relacionados à infraestrutura e movimentação de passageiros, aeronaves e cargas, e o segundo com adicional de uma proxy do indicador ambiental, a partir da emissão de poluentes, considerado um output indesejado. Adicionalmente, um segundo estágio de análise foi utilizado para avaliar a influência de variáveis explicativas, como as emissões, no peso da eficiência obtido no DEA Ambiental. As associações com fatores exógenos dão uma melhor compreensão do cenário contextual em que o aeroporto opera (Iyer; Jain, 2019).

Justifica-se a contribuição do tema uma vez que questões relacionadas com o desempenho aeroportuário considerando aspectos ambientais, segurança e proteção são menos frequentes na literatura. De acordo com Bezerra e Gomes (2018), estudos envolvendo as externalidades geradas pelas atividades aeronáuticas e aeroportuárias que podem produzir impactos na sustentabilidade ambiental local, como ruído, qualidade do ar, qualidade da água e conservação de energia, são recentes na literatura e ainda pouco explorados.

3. MÉTODO

Para averiguar o comportamento das concessões brasileiras e a influência de fatores ambientais, neste estudo representados pelas emissões de poluentes, a pesquisa possui cinco fases de análise. Primeiro aplica-se a (1) metodologia DEA para a análise operacional de 18 aeroportos concessionados até a quinta rodada de concessões do Governo Federal (ANAC, 2022c), aplicada em janela e realizada de forma anual para os anos 2010 a 2021. As variáveis (ANAC, 2022a; ANAC, 2022b) de *inputs* são:

• Área do terminal de passageiros (m²): área total do TPS, incluindo a área para atividades comerciais;

• Comprimento total da pista de pouso e decolagem (m): representa o comprimento da pista principal de pouso e decolagem, em caso de operações não simultâneas. Isso se deve ao fato de que o input deve estar associado as movimentações por hora, e que para mais de uma pista, pode ser contabilizado o somatório dos comprimentos apenas em caso de operações simultâneas de pouso e decolagem.

Para os *outputs*, são considerados as seguintes variáveis:

• Movimento de passageiros: total de passageiros embarcados e desembarcados, nacionais e internacionais, regulares e não regulares;

• Movimentos de aeronaves: número total de chegadas e partidas de aeronaves, nacionais e internacionais, regulares e não regulares;

• Movimentação de carga (kg): carga aérea total embarcado, desembarcado e em trânsito, de destinos nacionais e internacionais,regulares e não regulares;

O DEA fornece os pesos da eficiência dos terminais ano a ano e aponta os ineficientes. Em seguida, as folgas relativas são calculadas, sendo essas capazes de identificar as variáveis de desempenho mais prejudiciais, do ponto de vista produtivo.

De posse dos dados de eficiência calculados, inicia-se a coleta e análise dos fatores indesejados, a saber, as emissões de poluentes das aeronaves e APU's, esses originados das aeronaves da aviação civil comercial e privada, tanto em voos regulares (domésticos e internacionais com origem no Brasil) quanto voos da aviação geral (ANAC, 2019). Os dados obtidos são referentes apenas aos anos 2016 a 2018, o que faz com que a próxima análise do DEA seja realizada num horizonte temporal mais curto. Para a utilização dos gases poluentes, aplica-se o (2) método PCA, capaz de reduzir a quantidade de variáveis no dimensionamento dos dados. Cada dado isolado (gases) é considerado componentes,em que esses são obtidos a partir de uma decomposição da matriz de correlação (Pitombo; Gomes, 2014; Silva *et al.*, 2022). Ou seja, cada componente traz um autovalor e a proporção percentual que aquele dado explica do todo. Segundo Pitombo e Gomes (2014), os autovalores são números que refletem a importância de cada dado, sendo resultado de uma decomposição que indica o quanto cada dado está associado a cada um dos fatores envolvidos.

A cada componente, é possível observar se o valor da proporção percentual consegue explicar por si só todos os fatores envolvidos. E para cada componente, tem-se a carga dos autovetores, utilizada como fator multiplicador. Assim, para um componente escolhido como capaz de explicar o todo, aplica-se a metodologia de acordo com a Equação 1.

$$\overrightarrow{Componente = Dado1 * Autovetor1 + Dado\ 2 * Autovetor2 + \cdots + DadoN * AutovetorN} \quad (1)$$

Nesse sentido, o componente obtido é a nova variável, única, capaz de sintetizar em um só número um conjunto de dados. A variável de poluentes é utilizada para o estudo do DEAambiental e regressão Tobit.

Em terceiro, aplica-se o (3) DEA ambiental, realizado de forma anual, para os anos 2016 a 2018, e rodados de forma conjuntapara os 18 aeroportos com as mesmas variáveisutilizadas no DEA Operacional mais as emissões dos APU's e aeronaves. Da mesma forma que o DEA operacional, o DEA ambiental calcula os pesos da eficiência e as folgas relativas. Posteriormente, (4) compara-se os resultados entre ambas as metodologias DEA's, a saber, operacional e ambiental.

Por fim, a quinta fase é aplicada através da (5) regressão Tobit, em que os pesos de eficiência ambiental se tornam as variáveis dependentes, e outras três como variáveis explicativas. Entre elas, tem-se as emissões dos poluentes agregadas em uma única variável calculada pelo método PCA, a idade da frota aérea brasileira e os *scores* de eficiência operacional obtidos pelo DEA Operacional.Quando se diz *scores*, indica-se a pontuação percentual da eficiência, podendo variar de 0% a 100%. Os próximos passos resultam dos testes estatísticos da regressão, avaliando o melhor modelo que explica a

relação com os *scores* de eficiência ambiental. Finalmente, é possível avaliar os resultados e apresentar as considerações finais e recomendações.

4. RESULTADOS

4.1 Eficiência Operacional

A eficiência operacional dos 18 aeroportos foi avaliada pela Análise Envoltória de Dados (DEA) em janela entre os anos 2010 e 2021, conforme visto na *Tabela 1*.

Tabela 1: Eficiência total média dos aeroportos por janela

	1	2	3	4	5	6	
IATA	2010-2016	2011-2017	2012-2018	2013-2019	2014-2020	2015-2021	Média
VCP	96,5%	96,7%	96,6%	96,6%	96,7%	92,1%	95,9%
GRU	96,1%	97,6%	96,2%	96,8%	92,1%	91,6%	95,1%
POA	96,8%	97,6%	97,4%	97,7%	89,8%	84,3%	93,9%
VIX	93,5%	95,7%	96,4%	96,5%	90,0%	86,4%	93,1%
CGB	95,5%	96,2%	95,7%	94,8%	85,3%	80,6%	91,4%
JDO	93,1%	95,7%	93,9%	92,6%	86,8%	84,1%	91,0%
CPV	91,9%	87,1%	90,0%	93,0%	87,7%	86,8%	89,5%
CNF	90,4%	92,4%	92,3%	92,1%	84,3%	81,8%	88,9%
BSB	89,1%	85,7%	82,0%	77,8%	84,4%	79,9%	83,2%
FOR	72,3%	73,8%	75,7%	75,2%	69,7%	73,3%	73,4%
REC	59,6%	61,7%	64,1%	66,6%	66,2%	84,7%	67,2%
FLN	67,8%	69,6%	70,2%	65,1%	56,6%	60,1%	64,9%
SSA	53,8%	53,1%	51,5%	49,5%	51,7%	55,6%	52,5%
GIG	46,6%	46,8%	45,4%	42,8%	42,3%	36,3%	43,4%
AJU	34,0%	35,2%	35,6%	34,6%	31,9%	31,4%	33,8%
JPA	28,5%	30,1%	31,1%	31,4%	29,9%	33,7%	30,8%
MCZ	26,0%	27,4%	28,8%	29,7%	28,1%	35,2%	29,2%
NAT	37,0%	33,6%	29,8%	25,6%	20,6%	27,2%	29,0%

A Tabela 1 mostra que os aeroportos VCP, GRU e POA obtiveram maiores eficiências médias no período, e que NAT apareceu em último lugar no *ranking*. O aeroporto de Viracopos, com 95,9% de eficiência média, ficou em primeiro lugar no *ranking*, sendo esse o que operou com melhor performance entre 2010 e 2021. GRU, em segundo lugar, possui eficiências médias oscilantes durante as janelas. Entre os aeroportos da amostra, GRU possui a maior movimentação de passageiros, e passou por obras de expansão, em especial, a partir de 2014 com aumento da área do terminal de passageiros.

Quando comparado com VCP, ambos possuem comprimentos de pistas similares, sendo GRU com 280% a mais de movimentação total de passageiros do que VCP no período de estudo. É válido pontuar, contudo, que em 2017, a concessionária do aeroporto de Viracopos decidiu devolver o ativo ao poder público e, atualmente, encontra-se em recuperação judicial. Não se levou em consideração a utilização do patrimônio da concessionária, em que ela apresentou má utilização dos recursos e presenciou gastos e custos de capital exagerado, o que difere os resultados de VCP da realidade, em que a concessionária não cumpriu o contrato de concessão.

Ao observar a terceira posição, POA aparece com 93,93% de eficiência média. É válido pontuar que POA se encontra a frente de grandes aeroportos devido ao aumento significativo nas variáveis de outputs, com um crescimento de quase 30% de passageiros e 15% da carga ao longo dos 12 anos estudados. Em relação à operação de aeroportos de mesma concessionária, FOR e POA possuem eficiências médias discrepantes, com FOR atingindo 73,35%.

A análise média de eficiência permite observar que NAT, como primeiro aeroporto a ser concessionado, aparece na 18ª posição (última). O resultado pode se dar com a capacidade de pista e de terminal não ser compatível com a movimentação de passageiros ao longo dos anos, em comparação com um aeroporto mais próximo da fronteira de eficiência. Ou seja, para uma movimentação análoga, se dispõe de um aeroporto com infraestruturas superestimadas para a movimentação ocorrida. Para 2021, segundo menor ano de movimentação desde a concessão, ao verificar os dados da janela 6, em que o referido ano se encontra, se tem BSB, CGB e POA como benchmarkings. Brasília, Cuiabá e Porto Alegre aparecem com eficiência média acima de 83%, com o aeroporto no Rio Grande do Sul com maior eficiência entre os demais.

Entende-se que os aeroportos que tiveram maiores *scores* possuem melhor

correlação entre o uso da infraestrutura com a demanda obtida durante os anos do que aqueles com menores *scores*. É importante mencionar que o modelo DEA oferece uma análise relativa ao desconsiderar fatores inerentes às características próprias dos contratos de concessão, o tempo de concessão, os modelos de gestão de recursos e gastos, além dos custos de capital incorridos pela concessionária. Tais fatores podem gerar resultados parciais, como por exemplo, o aeroporto VCP estar na primeira posição do *ranking* de eficiência gerado pelo modelo, como citado.

Nesta investigação, observa-se os resultados de folga média de cada variável para cada DMU em cada janela. 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. 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. A Tabela 2 mostra as folgas relativas para cada variável em cada aeroporto. Criou-se um ranking das variáveis que mais impactam a eficiência dos aeroportos considerados neste estudo: movimentação de carga (525,9%), movimentação de aeronaves (36,2%), área do TPS (-2,6%), movimentação de passageiros (1,6%) e comprimento de pista (-0,7%), respectivamente. Assim, para os aeroportos da amostra se mostrarem mais eficientes, precisaria aumentar em média a movimentação de carga em 525,9%, aeronaves em 36,2%, e passageiros em 1,6%. Em contrapartida, a área do TPS e comprimento de pista encontram-se superestimados para a movimentação de passageiros e aeronaves, em 2,6% e 0,7%, respectivamente.

Tabela 2: Média das folgas relativas de cada variável por aeroporto – DEA Operacional

	Área TPS	***Comp. Pista***	***Mov. Pax***	***Mov. Aeronaves***	***Mov. Carga***
AJU	0,0%	0,0%	0,23%	85,5%	1748,6%
BSB	0,0%	-1,5%	0,1%	4,2%	101,9%
CGB	0,0%	0,0%	0,9%	7,9%	39,7%
CNF	-15,0%	0,0%	0,1%	0,0%	189,1%
CPV	0,0%	0,0%	3,3%	0,6%	23,9%
FLN	0,0%	-2,5%	0,0%	39,5%	1201,7%
FOR	-0,2%	0,0%	0,0%	37,7%	79,2%
GIG	-0,5%	-7,0%	10,2%	0,7%	219,9%
GRU	-0,2%	-0,3%	5,5%	3,1%	1,3%
JDO	0,0%	0,0%	3,2%	6,3%	4,4%
JPA	0,0%	0,0%	0,0%	131,0%	690,3%
MCZ	0,0%	0,0%	0,0%	158,3%	3632,2%
NAT	0,0%	0,0%	0,0%	130,6%	944,2%
POA	-7,7%	0,0%	0,2%	1,0%	0,3%
REC	0,0%	0,0%	0,0%	17,5%	150,4%
SSA	0,0%	-0,2%	2,1%	19,7%	436,4%
VCP	-24,2%	0,0%	1,7%	1,2%	0,6%
VIX	0,0%	-1,2%	1,6%	6,9%	1,3%
Média	**-2,6%**	**-0,7%**	**1,6%**	**36,2%**	**525,9%**

De acordo com a Tabela 2, o modelo sugere, em média, que a demanda ainda não alcançou a capacidade de infraestrutura existente (insumos), e que, assim, os produtos poderiam ser aumentados para cada DMU atingir a fronteira eficiente. Nota-se também que as folgas médias relativas nos *outputs* são mais recorrentes em comparação com as folgas médias relativas nos *inputs*, o que indica que as variáveis demanda possuem maior folga e assim, precisam de mais atenção. Conforme citado anteriormente, para a concessionária, o objetivo é intensificar a demanda, com melhorias nas entradas, não necessariamente com expansões de capacidade.

Para o TPS, VCP possui o maior percentual de redução (24,2%), indicando que a demanda do aeroporto não atingiu o que era esperado para as dimensões do aeroporto. Ao analisar a infraestrutura, um grande terminal herdado pode custar menos do que um construído pela concessionária. No tocante ao comprimento de pista, GIG aparece em primeiro na indicação que a movimentação de aeronaves não atingiu o esperado para a capacidade de movimentação da pista, e o primeiro para aumentar, em contrapartida, a movimentação de passageiros. Com base nos dados, o aeroporto é conhecido pela demanda ponto a ponto, com baixo % de conexões em comparação com o outro aeroporto na cidade (Santos Dumont). MCZ é apontado com a necessidade de aumento da movimentação de aeronaves em média de 158,3% e a movimentação de cargas em média de 3632,2%, em resposta a infraestrutura dos *inputs*. A movimentação de cargas é a variável

com maior intervalo de oscilação, sendo depois de MCZ, AJU com necessidade em média de aumento de 1748,6% para torná-lo eficiente.

4.2 Análise dos Componentes Principais

O método PCA foi aplicado a uma amostra de quatro poluentes e um tipo de fuligem advindos das atividades da aviação civil e aviação geral, a saber, monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV), óxidos de nitrogênio (NOx), dióxidos de enxofre (SO2) e material particulado (MP) (ANAC, 2019). Para isso, utilizou-se o software Gretl (2022). A aplicação de PCA mostrou que apenas um componente seria suficiente para a análise, a partir das cinco variáveis originais, com capacidade de explicar 98,9% da variabilidade da matriz original. A Tabela 3 aponta a matriz dos componentes principais e a proporção acumulada dos componentes e a Tabela 4 a carga dos componentes (autovetores).

Tabela 3: Matriz dos componentes principais

Componente	*Autovalor*	*Proporção*	*Acumulada*
1	4,9467	0,9893	0,9893
2	0,0447	0,0089	0,9983
3	0,0066	0,0013	0,9996
4	0,0014	0,0003	0,9999
5	0,0006	0,0001	1

Tabela 4: Carga dos componentes (autovetores)

Autovetores	*PC1*	*PC2*	*PC3*	*PC4*	*PC5*
COkg	0,448	-0,323	0,241	0,088	0,793
COVkg	0,444	-0,718	-0,095	0,069	-0,522
MPkg	0,447	0,461	0,474	0,539	-0,269
NOxKg	0,448	0,318	-0,818	0,132	0,11
SO2kg	0,449	0,258	0,197	-0,824	-0,117

Conforme observado, a componente 1 é capaz de explicar a variável poluentes, conforme a Equação 2 a seguir, advinda da carga dos autovetores.

$$Poluentes = CO * 0{,}448 + COV * 0{,}444 + MP * 0{,}447 + NOx * 0{,}448 + SO2 * 0{,}449 \quad (2)$$

Assim, as cinco variáveis podem ser sintetizadas em apenas uma componente que representa os atributos que supostamente influenciam o comportamento dos poluentes por aeroporto.

4.3 Eficiência Ambiental

No tocante a eficiência ambiental, a análise considerou o período de 2016 a 2018, devido àdisponibilidade dos dados. Os inputs correspondem a área TPS e comprimento de pista, e os outputs a movimentação de passageiros, aeronaves e cargas. A variável emissão de poluentes obtida pelo PCA entra no modelo como output indesejado, ou seja, como a eficiência se comporta na presença de uma variável que pode desfavorecer o todo, na presença de variáveis já observadas na eficiência operacional. Para a modelagem, não se utilizou a análise em janela devido ao período dos dados, sendo realizada, portanto, de forma unificada no MaxDea (2022). A Tabela 5 apresenta os valores de eficiência por ano para cada aeroporto em estudo.

Tabela 5: Eficiência Ambiental para as 54 DMU's (18 aeroportos x 3 anos)

IATA	*2016*	*2017*	*2018*	*Média*
AJU	98,0%	100,0%	100,0%	99,3%
BSB	100,0%	98,4%	100,0%	99,5%
CGB	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
CNF	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
CPV	93,1%	100,0%	100,0%	97,7%
FLN	97,8%	99,3%	97,8%	98,3%
FOR	99,9%	100,0%	100,0%	100,0%
GIG	86,8%	89,4%	91,1%	89,1%
GRU	97,4%	95,8%	100,0%	97,7%
JDO	98,3%	100,0%	100,0%	99,4%
JPA	93,0%	92,6%	94,2%	93,3%
MCZ	97,2%	98,6%	99,1%	98,3%
NAT	95,5%	98,3%	96,0%	96,6%
POA	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
REC	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
SSA	97,9%	99,4%	99,4%	98,9%
VCP	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
VIX	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Média	**97,5%**	**98,4%**	**98,8%**	**-**

Ao observar a Tabela 5, percebe-se que a eficiência ambiental foi aumentando para 88,9% dos aeroportos entre os anos de 2016 e 2018. Os terminais que perderam eficiência são FLN e NAT, o que indica que apesar do aumento de movimentação nos principais aeroportos do país, as emissões estavam sendo controladas. Ainda, observa-se que, com exceção de BSB, todos os aeroportos possuíram eficiência em 2016 menor que a eficiência média, o que reflete de que melhorias estão sendo inseridas com o tempo, seja no aeroporto e/ou na frota aérea. Quando se analisa a eficiência média por ano, também se nota que a eficiência aumentou, e saiu de 97,5% em 2016 para 98,8% em 2018. É válido pontuar que possíveis balanceamentos nas emissões, à medida que se tem a modernização da frota áerea, com medidas que minimizam os poluentes.

Pode-se citar que aeronaves mais modernas possuem tecnologias que ajudam a reduzir a emissão de poluentes. Motores mais leves, impressão 3D de peças, revestimentos e utilização de bicombustíveis, por exemplo, são fatores que ajudam a minimizar os impactos ao ambiente. Em 2019, a aviação civil foi responsável pela emissão de cerca de 915 milhões de toneladas de CO2, equivalente a pouco mais de 2% de todas as emissões de carbono geradas pelas atividades humanas (IATA, 2021).

Ao observar ambas as eficiências operacionais e ambientais, os aeroportos obtiveram nos anos 2016, 2017 e 2018 *scores* de eficiência ambiental maior do que o operacional. Assim, mesmo com a presença dos poluentes, os aeroportos se mostraram mais suscetíveis à perda de eficiência na presença de dados de infraestrutura e operação.

4.4 Regressão Tobit

Para a última fase, a variável dependente inserida foram os *scores* da eficiência ambiental e as variáveis explicativas foram o quantitativo de poluentes, a idade da frota aérea nacional e os *scores* da eficiência operacional, conforme observado na Equação 3.

$$Efi.Ambiental = \beta_0 + \beta_1 * EmissãoPoluentes + \beta_2 * IdadeFrota + \beta_3 * Efi.Operacional + u \quad (3)$$

Onde $\beta 0 ... \beta 3$ são, respectivamente, o intercepto e a inclinação e u o erro estocástico.

O processo de ajuste do modelo formado é realizado através da aplicação de testes estatísticos que comprovam que não há problema de colinearidade. Os parâmetros com melhor significância estatística são aqueles cujos valores das estatísticas-t são elevados (maiores que 1,96 e menores que -1,96) e onde os p-valor são baixos (menor que 10%), o que permite excluir a hipótese de influência nula da variável (Gujarati; Porter, 2011). Os resultados da regressão podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6: Resultado Regressão Tobit

	Coeficiente	***ErroPadrão***	***Razão-t***	***P-valor***	
Const	1,03521	0,231071	4,48	4,3E-05	***
Emissão Poluentes	−2,148E-08	8,46E-09	−2,539	0,0143	**
IdadeFrota	−0,016	0,040757	−0,4028	0,6888	
Efic. Operacional	0,06597	0,01351	4,884	1,1E-05	***
R^2	0,34				
Observações	54				

A emissão de poluentes possui relação negativa com os *scores* de eficiência ambiental, o que indica que o aumento da poluição traz resultados maléficos para a performance ambiental. Por outro lado, os *scores* de eficiência operacional possuem relação positiva com a eficiência ambiental. Esses percentuais promovem coerência com os dados de infraestrutura e movimentação, que também são considerados na análise.

Observou-se que a idade da frota não apresentou significância estatística, possivelmente por uma extrapolação para os anos subsequentes, e pela diferença entre as idades das frotas ser pequena, uma vez que o período analisado é curto. Sabe-se que aeronaves mais modernas estão predispostas a tecnologias que reduzem emissões já que,

entre outros, consomem menos combustíveis. Acredita-se que é possível que aeronaves mais antigas contribuam menos para a eficiência ambiental, porém análises mais robustas precisam ser feitas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No tocante à revisão de literatura feita em trabalhos que analisam eficiência do transporte aéreo, percebe-se que existem inúmeros estudos que focam na avaliação operacional dos terminais, e outros que avaliam separadamente o aspecto ambiental. Em geral, a eficiência é analisada de forma parcial, em que se olha por cada viés separadamente. Entretanto, o conceito de eficiência está relacionado a produzir o máximo com os recursos disponíveis, ao mesmo tempo em que o custo e o desperdício devem ser minimizados. É preciso avaliar uma entidade como um todo, com tudo aquilo que pode beneficiar e tudo o que pode prejudicar. A pergunta de pesquisa é se as concessões aeroportuárias estão, de fato, ampliando a eficiência dos aeroportos, mesmo quando se acrescenta um fator indesejado, como as emissões de poluentes, que se entende ser fundamental na avaliação de eficiência.

Para o estudo em questão, o objetivo consistiu em ampliar o paradigma dos estudos de eficiência, para que se possa inserir variáveis que consigam abordar os aspectos positivos e negativos da entidade. No caso, utilizou-se variáveis ambientais representadas pelos poluentes como gases e fuligem. Quando se avalia a eficiência com as emissões de poluentes, entende-se o conceito de eficiência líquida, a saber, o que pode contribuir para os *scores* menos o que pode prejudicar. Os objetivos específicos foram analisar o efeito do fator emissões de poluentes na eficiência operacional e ambiental como forma de ampliar a discussão sobre ganhos de eficiência em aeroportos concessionados, introduzir esse conceito amplo de eficiência, e colaborar com o meio acadêmico com uso de regressões comvariáveis ambientais.

É importante mencionar que o modelo utilizado possui limitações por causa de variáveis que não foram utilizadas, como particularidades de cada contrato dos blocos de concessões, *dummy* que indicasse se aquele aeroporto já estava concedido no ano e poluentes dos veículos em vias patrimoniais e outros equipamentos de pátio. Sabe-se que cada contrato possui especificidades, uma vez que as rodadas de concessões possuem diferentes níveis de investimentos, participação do órgão público, gastos e custo de capital e métodos de operações que podem afetar o desempenho dos aeroportos.

6. REFERÊNCIAS

ANAC. (2019). *Inventário nacional de emissões atmosféricas da aviação civil.* Brasília, DF: Retrieved from Sep18, 2021, from: https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-da-aviacao-civil.

ANAC. (2022a). *Base de dados estatísticos do transporte aéreo*. Brasília, DF: Retrieved Nov 24, 2021, from: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/empresas-aereas/envio-de-informacoes/base-de-dados-estatisticos-do-transporte-aereo.

ANAC. (2022b). *Ministério da Infraestrutura e Secretária Nacionalde Aviação Civil.* Brasília, DF: Retrieved Nov 26, 2021, from: https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/#Movimentacao/Comparativo.

ANAC. (2022c). *Concessões de aeroportos*.Brasília, DF: Retrieved Sep 24, 2021, from: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/concessoes.

Bezerra, G. C. L.; Gomes, C. F. (2018). *Performance measurement practices in airports: Multidimensionality and utilization patterns*. Journal of Air

Transport Management, v. 70, p. 113-125. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.05.006.

Gretl (2022). Cottell, A.; Lucchetti, R. *Gnu regression, econometric and time-series library Gretl.* Software Livre. Disponível em: http://gretl.sourceforge.net/. Acesso em: 10 dez. 2022.

Gujarati, D. N.; Porter, D. C. (2011) *Econometria básica*. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora.

IATA (2021) *INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION.* Fact sheet: aviation and climate change. Montreal. Disponível em: https://www.iata.org/en/iata repository/pressroom/fact sheets/fact sheet climate change/. Acesso em: 01 apr. 2023.

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

MaxDea Software (2022). *MaxDEA 8 Ultra (4-Core) 8.1.0*. Beijing Realworld Software Company Ltd. Disponível em: http://maxdea.com.

Pitombo, C. S.; Gomes, M. M. (2014). *Study of Work-Travel Related Behavior UsingPrincipal Component Analysis*. OpenJournal of Statistics, v. 4, p. 889-901. http://dx.doi.org/10.4236/ojs.2014.411084

Rolim, P. S. W.; Bettini, H. F. A. J.; Oliveira, A. V. M. (2016). *Estimatingthe impact of airport privatization onairline demand: a regression-based event study.* Journal of Air Transport Management, v. 31, p. 31-41. Doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.03.019.

Silva, C. J. L.; Andrade, M. O.; Falcão, V. A.; Silva, C. F. A. *The geographical characteristics of subsidized air routesserving as lifelines*. Journal of Air Transport Management, v. 104, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102280.

Toledo, F. S.; Falcão, V. A.; Camioto, F. A.; Silva, P. A. L. (2021) *Does privatization make brazilian airports more efficient?* Transportes, v. 29, n. 2. http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v29i2.2304.

MODELO DE ACIDENTE DE AERONAVES POR COLISÃO COM AVES NA AVIAÇÃO COMERCIAL

Bruna Borges Azevedo*
Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira
Universidade Federal de Goiás – Faculdade de Ciências e Tecnologia
Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: brunabazevedo.eng@gmail.com

PAPER ID: SIT2264

ABSTRACT

Air transport is one of the fastest growing markets in the world and one of the most relevant sectors for the development of the country's economy. However, all this growth also leads to increased occurrence of accidents. Birdstrikes are a specific type of accident that has been a problem for aviation since its inception. Understanding the dangers or factors involved in this event is vital for adopting mitigating measures. Thus, the objective of this study is to develop an aviation accident model that is able to quantify the impact of the main factors involving collisions of commercial aircraft with birds in the landing and takeoff phases. The selected factors (time, cloud cover, species behavior, species mass, flight phase, AGL height, affected part of the aircraft) for the model construction are validated by the literature and in the model, configuration are divided into four categories (environment, bird, aircraft, and event). A survey of the main factors and occurrences in Brazil was carried out between 2011 and 2021. From the analysis, the "Birdstrike Aircraft Accident Model" was proposed, developed using the Bayesian Networks method. The model was represented graphically and the impact of the global - of the states that make up the selected factors - was obtained in scenarios with and without evidence. The states with the highest impacts are: (#1); landing phase as the most critical (#2); aircraft speed up to 80 knots (#3); engine as the second main part reached (#4); AGL height up to 500 feet (#5); radome as the third main part reached (#6); a bird (#7) mass up to 1500 grams (#8); nighttime (#9), clear sky (#10).

Keywords: Air Transport, Accident model, Birdstrike, Safety, Bayesian networks.

ACKNOWLEDGEMENT

As autoras agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq concedido por meio do processo no 168071/2022-3 na modalidade Iniciação Tecnológica – ITC-A concedido a partir do projeto "PI06353-2022 – Desenvolvimento de modelo de acidente em operações de pouso e decolagem de aeronaves comerciais". A segunda autora agradece o apoio do Laboratório de análise, avaliação e gerenciamento de risco (LabRisco) pelo qual é membro do Grupo de Pesquisa em Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos.

1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo é essencial para o desenvolvimento econômico e social de um país e, em virtude da possibilidade de conexões rápidas, facilita o deslocamento de bens e pessoas, permite o fluxo de agentes de negócios e impulsiona atividades comerciais (EPL; ONTL, 2022). Trata-se de um dos mercados mundiais de mais rápido crescimento. Desde a década de 1970, enquanto a aviação global cresceu a uma taxa média anual de 5,5% em volume de passageiros, a aviação brasileira evoluiu ao ritmo de 7,7% ao ano (ABEAR, 2016). É, portanto, um dos setores mais relevantes para o desenvolvimento da economia do país e melhoria da qualidade de vida dos cidadãos (Oliveira, 2018).

Todavia, com o aumento da quantidade de viagens, da frota de aeronaves e dos movimentos de voo, aumentam-se as ocorrências de acidentes e incidentes. Um dos acidentes que representam problema para o setor de aviação, desde que os humanos iniciaram sua aventura pelos ares há mais de 100 anos, são as colisões de aeronaves com aves, que cada vez mais competem por espaço aéreo em céus lotados. (Blokpoel, 1976; CENIPA, 2020; Cleary & Dolbeer, 2005).

Para que se configure como colisão, pelo menos uma das situações a seguir deve ocorrer: testemunho da tripulação; evidência ou dano decorrente identificado na aeronave; carcaça de animal localizado em até 60 metros do eixo de pistas de pouso e de táxi ou 300 metros das cabeceiras; ou presença de fauna em ou fora do aeródromo que exerça efeito significativo sobre a operação de aeronave (CENIPA, 2020).

No Brasil, no período dos anos de 2016 a 2020, foram relatados 42.765 eventos, e destes, 5.356 se deram por colisão com aves (CENIPA, 2021). Este conflito assume proporções ainda maiores ao passo que colisões significativas – que apresente danos decorrentes – podem causar perdas econômicas substanciais, mortes de tripulantes e passageiros, perda de carga e custos associados para a indústria (Allan, 2006; Azabache-Requena & Marcial-Ramos, 2019; Jeffery & Buschke, 2018; Soldatini et al., 2010).

A natureza e a magnitude dos desafios e problemas enfrentados vai depender da interação de muitos fatores (Cleary & Dolbeer, 2005). Deste modo, a compreensão dos perigos ou fatores do risco aviário, se torna vital para a adoção de medidas de gerenciamento com vistas à mitigação do risco de colisões.

Dentro desta abordagem, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de acidente para a aviação que seja capaz de quantificar o impacto dos principais fatores que envolvem colisões de aeronaves comerciais com aves em fases de pouso e decolagem de voo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Para a concepção do modelo de acidente torna-se crucial investigar os fatores envolvidos nas colisões entre aeronaves e aves e compreender como relacionam-se entre si. Com esse intuito, recorreu-se à literatura – acadêmica e normativa – para descrever os principais fatores envolvidos neste tipo de ocorrência.

O trabalho de Bandeira et al. (2017) mostra como relacionar fatores de diferentes categorias para um tipo de acidente específico; e em Bandeira et al. (2018), mostra a descrição de fatores de várias categorias e como relacioná-los em uma análise probabilística usando redes bayesianas. Vários estudos presentes na literatura avaliam o risco de colisões entre aeronaves e aves, de modo a fornecer uma visão geral do problema, levantando fatores envolvidos e definindo sua influência para a ocorrências dos eventos, bem como buscando estimar sua probabilidade e/ou gravidade relacionada (Azabache-Requena & Marcial-Ramos, 2019; Dolbeer, 2000; Linnell et al., 1996; Schumacher & Henkes, 2020).

Outra abordagem comum na literatura é a realização de avaliação de risco em um aeroporto específico, analisando as espécies presentes e seu comportamento, classificando e as ranqueando quanto sua contribuição para o risco de ocorrência de colisão com as aeronaves operados no aeródromo de modo a determinar espécies e condições prioritárias para medidas de mitigação (Azabache-Requena & Marcial-Ramos, 2019; Guedes et al., 2020; Linnell et al., 1999; Soldatini et al., 2010).

Alguns dos fatores comuns em vários estudos são fase de voo, altitude, velocidade, massa das espécies, quantidade de aves atingida, cobertura de nuvens, movimentação de aeronaves, parte atingida da aeronave, comportamento de voo, horário, categoria da aeronave, estação do ano, custos, entre outros.

A Tabela 1 sintetiza fatores comuns citados na literatura e ainda, a presença de cada um nos estudos analisados e considerados nesta pesquisa (provenientes da literatura acadêmica ou normativa). Salienta-se que o Manual de Gerenciamento de Risco de Fauna, orienta a necessidade da caracterização do uso do solo do aeródromo e Área de Segurança Aeroportuária – ASA, pois pode representar condições atrativas para a fauna, como: áreas verdes, gramados, drenagem, resíduos, entre outros (CENIPA, 2017). A metodologia de Oliveira (2017) também sugere a análise do fator uso do solo, no entanto com outro foco: em relação à concentração de pessoas. Entre as duas análises, o presente trabalho adota o segundo, por ter maior relevância para a segurança das operações, principalmente por considerar o grau de habitação do entorno do sítio aeroportuário.

Tabela 1 Resumo dos principais fatores levantados da literatura.

Fator	Fase de voo	Altura	Horário	Velocidade	Parte atingida	Cobertura de Nuvens	Massa da espécie	Comportamento da espécie	Solo ASA
(Linnell et al., 1996)	X				X	X	X	X	
(Linnell et al., 1999)	X		X			X	X	X	
(Zakrajsek & Bissonette, 2005)					X				
(Allan, 2006)							X		
(Dolbeer, 2006)		X	X						
(Shaw & Mckee, 2008)	X	X	X		X	X	X	X	
(Soldatini et al., 2010)			X				X	X	
(Allan et al., 2016)							X		
(Oliveira, 2017)		X	X	X			X	X	X
(CENIPA, 2017)	X	X	X	X	X	X	X	X	
(Jeffery & Buschke, 2018)							X	X	
(Oliveira, 2018)	X			X					
(Nimmagadda et al., 2020)	X	X	X		X	X	X	X	
(Ghazaoui et al., 2022)								X	

Ressalta-se que devido as colisões com aves serem uma das ocorrências mais recorrentes na aviação, há muitos trabalhos desenvolvidos abordando o tema. Porém, uma análise mais aprofundada e abrangente dos fatores para a probabilidade de ocorrência de uma colisão com aves e como estes se relacionam entre si – está ausente na maioria dos procedimentos de avaliação de risco, exceto em Oliveira (2018), onde o autor utilizou a opinião de especialistas no cálculo de probabilidades. Destaca-se ainda que, modelos de acidentes que possam relacionar e/ou quantificar o impacto dos fatores envolvidos nesse tema não foram encontrados, até o presente momento, portanto, são escassos na literatura.

3. METODOLOGIA

Os reportes dos eventos envolvendo fauna no Brasil são realizados por meio da Ficha CENIPA 15 online pelo Sistema de Gerenciamento de Risco Aviário – SIGRA. São informados os casos de colisões, quase colisões e avistamentos pelo operador do aeródromo, equipe de gestão da fauna, tripulação, controladores de tráfego aéreo e outros. A base com os dados dos reportes é disponibilizada no Portal de Dados Abertos do Governo Federal pelo CENIPA em arquivo de

formato *csv* e nela, consta 23.001 reportes de colisões com fauna no Brasil entre os anos de 2011 e 2021 (abrangência nacional). As informações das espécies (tamanho, nome, quantidade atingida) envolvidas, são disponibilizados em base de dados separada no Portal de Dados Abertos. As duas bases, de "Reportes Risco Fauna 2011 a 2021" e "Espécies do Risco de Fauna de 2011 a 2021", apresentam em comum o código do reporte. Logo, foi possível unificá-las com auxílio da função *procv* no Excel®.

Para atender o objetivo, primeiramente foi realizado filtro dos dados de colisões com aves que envolveram aeronaves comerciais (com capacidade acima de 30 passageiros). Deste primeiro filtro, a base passou a contar com 16.825 reportes. No segundo filtro, foram analisados os reportes que envolveram aves. Finalmente, chegou-se ao valor total de 15.033 reportes de colisões, que foram consideradas para análise. Destes 6.626 envolveram aves; apenas um envolveu ave como segunda espécie e 8.406 com espécie não identificada para as fases de pouso e decolagem. Logo, este dado é referente aos casos favoráveis utilizados neste trabalho.

Destaca-se que das 15.033 colisões entre aves e aeronaves comerciais consideradas, 69,35% estão concentradas em 20 aeródromos do País. O Aeroporto de Guarulhos – SP (SBGR), Porto Alegre – RS (SBPA), Viracopos – SP (SBKP), Galeão – RJ (SBGL) e o de Brasília – DF (SBBR) ocupam as cinco primeiras colocações com maiores quantidades de colisões informadas entre os anos de 2011 e 2021. Outro fato relevante é que, 98,88% das 15.033 colisões ocorreram dentro da Área de Segurança Aeroportuária (ASA) e, em 12,5% informaram danos e/ou prejuízos decorrentes.

Para compor a análise dos casos favoráveis (colisões) dentro do universo dos casos possíveis (movimentos de aeronaves), buscou se dado referente à movimentação de aeronaves no Brasil. Os dados selecionados são advindos do sistema Hórus da Secretaria Nacional de Aviação Civil – SAC, que apresenta informações sobre a aviação civil brasileira dos aeródromos do País. Foram considerados os dados referentes a evolução anual da movimentação de aeronave, via voos domésticos e internacionais, embarque e desembarque, de voos regulares dos aeródromos das capitais e regionais no período de 2011 a 2021. Dentro deste recorte, segundo o portal, ocorreram no Brasil para o período, um total de 18.365.246 movimentos de aeronaves. Os dados foram consultados no *website* no mês de agosto do ano de 2023 e são exibidos por ano considerado na Figura 1.

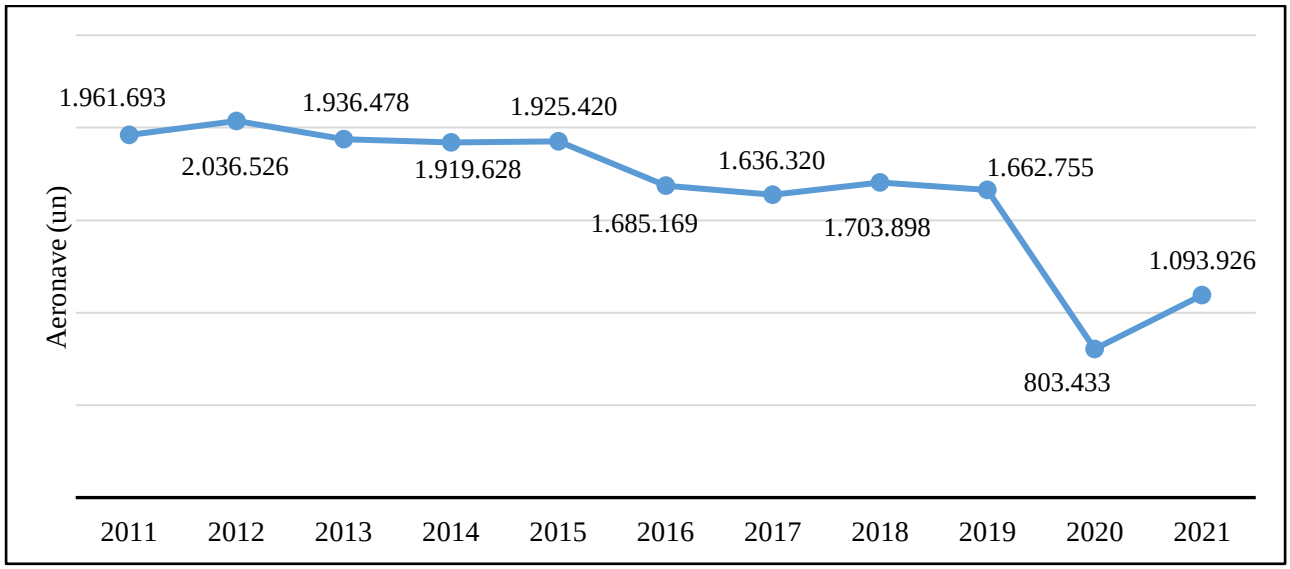


Figura 1 Movimentação de aeronaves no Brasil de 2011 a 2021.
Fonte: Hórus – LabTrans/SAC (2023) adaptado pelas autoras.

3.1. Redes Bayesianas

Foi utilizado a teoria de Rede Bayesiana, por ser um método da inteligência artificial, é capaz de estimar probabilisticamente os eventos de um sistema complexo. Esta teoria permite a representação gráfica do modelo ou sistema e das suas relações entre as variáveis.

Tal representação, facilita o entendimento de sistemas que dependem de muitos fatores, sendo possível a compreensão com facilidade das relações de dependência (Oliveira, 2018).

A probabilidade de um evento é uma medida de quão provável ou improvável o evento ocorra, portanto, as chances de ocorrência. Um evento será condicional a um segundo evento se sua probabilidade for alterada dado o conhecimento do estado do segundo evento (KRIEG, 2001). O cálculo de uma probabilidade posterior a partir de probabilidades anteriores, é realizado segundo o Teorema de Bayes. Este cálculo, se baseia na Lei da probabilidade Total, como consta da Equação 1.

$$P(B) = P(B|A_1)P(A_1) + \cdots + P(B|A_k)P(A_k) = \sum_{i=1}^{k} P(B|A_i)P(A_i) \quad (1)$$

Sendo:
$P(B)$: Probabilidade do evento B;
$P(B|A)$: Probabilidade condicional de B dado que ocorreu A;
$P(A)$: Probabilidade do evento A.

Uma rede de confiabilidade bayesiana (BBN – *Bayesian belief network)* é composta por um grafo direcional acíclico que representa um modelo de dependência em um domínio ou universo de interesse. As variáveis podem ser nós pais ou nós filhos. Em um nó que não recebe influência de nenhum outro, chama-se de "nó pai" e o "nó filho" se este é influenciado diretamente por aquele. Deve-se citar também, por essa lógica, que um nó raiz não tem pais e um nó filho não tem filhos (Krieg, 2001).

Em um cenário no qual algum estado dos nós é conhecido, é possível indicar ao modelo qual o valor do nó, de modo que a rede é atualizada com base nas evidências observadas (Oliveira, 2018). O software Netica® (Norsys Software Corp.) foi a ferramenta computacional utilizada para a realização das inferências em Redes Bayesianas.

3.2. Modelo de acidente por colisão com aves

Os fatores que constam na Tabela 1, foram selecionados para o Modelo de Acidente, uma vez que além de citados pela literatura, tem dados coletados nos reportes de colisões realizados junto ao CENIPA (exceto o fator "solo da área de segurança aeroportuária – ASA" por não ter dados satisfatórios para a análise e não ser contemplado nos bancos de dados oficiais, sendo necessário uma pesquisa de campo mais aprofundada).

Com base no levantamento dos fatores destacados pela investigação da literatura, foram definidos quatro categorias pelos quais estes se relacionam de forma direta e indireta: evento, ambiente, aves e aeronaves. O ambiente delimita fatores do ambiente externo, neste caso, horário e cobertura de nuvens. Aves é a categoria que delimita a fauna aviária, representada pelos fatores intrínsecos a espécime, como: massa da espécie e comportamento da espécie.

Os fatores ambientais influenciam diretamente as condições de presença e comportamento de aves, como foi apresentado na literatura, assim a relação de influência de ambiente e aves é direta. Por fim, a categoria aeronaves delimita condições específicas de operações de aeronaves que se destacaram na literatura e estão representados pelos fatores: fase de voo, altura AGL, velocidade e partes atingidas da aeronave.

Os estados para cada fator foram definidos considerando as informações coletadas para cada um nos reportes junto ao CENIPA e as sugestões de Oliveira (2017). A Tabela 2 apresenta o detalhamento das categorias, dos fatores e seus estados e o percentual de ocorrência de cada estado por aeródromo avaliado.

Tabela 2 Fatores e seus estados com percentual de ocorrência.

Categoria	Fator	Estados	Brasil 15.033 colisões 18.365.246 movimentos
Evento	Evento	Ocorre	0,082%
		Não Ocorre	99,918%
Ambiente	Horário	Dia	58,91%
		Noite	41,09%
	Cobertura de nuvens	Céu claro	62,54%
		Poucas nuvens	23,03%
		Encoberto	11,43%
Aves	Massa da espécie	≤ 1500 gramas	95,77%
		> 1500 gramas	4,21%
	Comportamento da espécie	1 ave	84,79%
		≥ 2 aves	6,78%
Aeronaves	Fase de voo	Pouso	56,82%
		Decolagem	36,33%
	Altura AGL	AGL ≤ 500 ft	90,73%
		500 < AGL ≤ 3500 ft	5,97%
		AGL > 3500 ft	2,09%
	Velocidade	≤ 80 kt	65,92%
		80 < V ≤ 200 kt	30,18%
		> 200 kt	1,80%
	Parte atingida	Fuselagem	17,55%
		Motor	15,31%
		Radome	15,82%
		Para-brisa	9,65%
		Asa	5,77%

Destaca-se que o estado pouso compreende as fases de pouso, descida e aproximação; o estado decolagem, as fases de decolagem e subida; e, o estado radome compreende as partes atingidas radome e nariz da aeronave.

A definição dos arcos ou links entre os nós foi direcional indicando o sentido de causalidade da rede, partindo dos fatores da categoria ‘ambiente’ à categoria ‘evento’. Os links foram determinados em acordo aos fatores (nós) que apresentam interação direta. Como as aves têm uma relação direta com a aeronave durante a operação e possibilitando uma colisão, e também indireta com o ambiente, o sentido dos arcos e a disposição dos nós dentro da rede estão apresentadas na Figura 2. Deste modo, da esquerda à direita da rede ou ainda, do ‘ambiente’ ao ‘evento’, pode-se observar a sequência estabelecida de influência entre os nós.

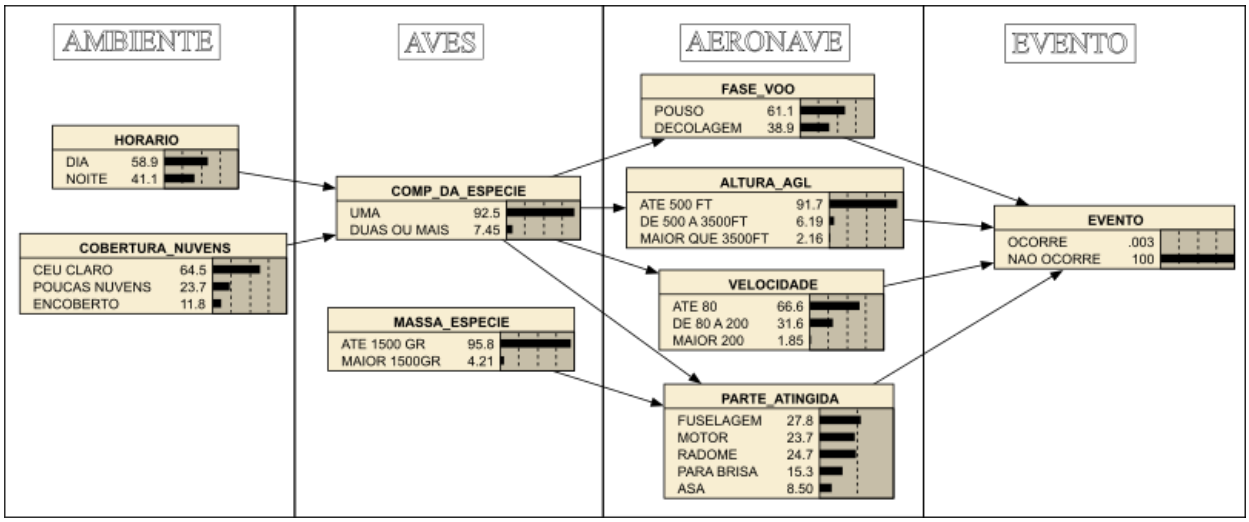


Figura 2 Rede bayesiana do Modelo de Acidente proposto representando o Cenário sem evidência

Construída a rede, foram gerados as Tabelas de Probabilidade Condicionais – TPC com todas as combinações possíveis de estados para cada nó. Nelas foram inseridos os valores das probabilidades reais para cada combinação de estados com base nos dados oficiais levantados do CENIPA e no dado de movimentação de aeronaves referentes às colisões de aeronaves com aves, consolidada após tratamentos anteriormente descritos.

A Figura 2 expõe a rede – com a representação dos nós e seus estados – criados no *software* Netica®. Nela são apresentadas as probabilidades dos nós – calculadas segundo as probabilidades a priori – se tratando, do cenário sem evidência, ou seja, o cenário base.

4. RESULTADOS

A BBN com evidência de que 'ocorreu' colisão de aeronaves com aves é apresentada na Figura 3, este resultado mostra as probabilidades de cada um dos estados dos fatores, dado que houve o evento. A BBN sem evidência da ocorrência da colisão foi apresentada na Figura 2.

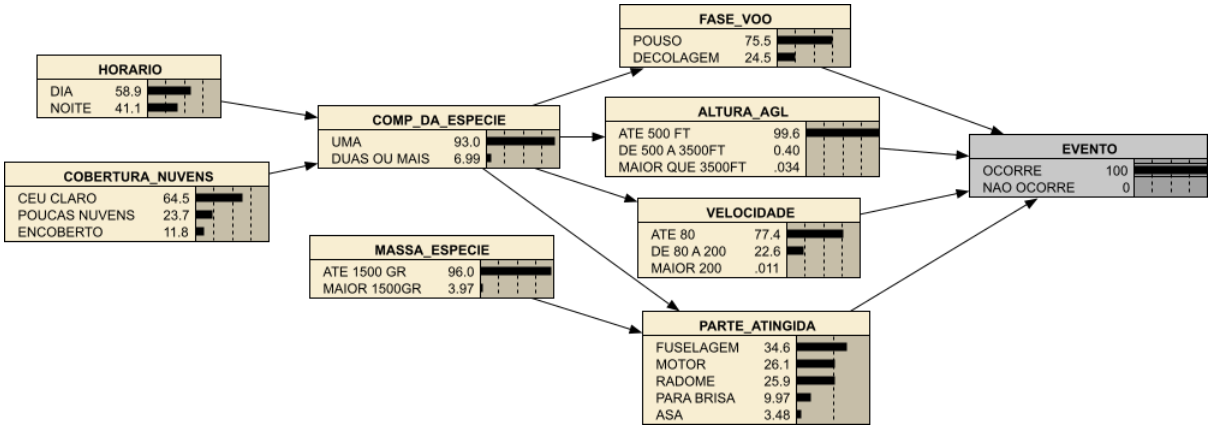


Figura 3 Rede bayesiana do Modelo de Acidente proposto representando o Cenário com evidência

Do cenário sem evidências, partindo dos dados estatísticos do cenário brasileiro, o modelo estimou uma probabilidade de 2,6293E-05 de ocorrer uma colisão de aeronaves com aves. Na Tabela 3 estão representadas todas as probabilidades dos estados de cada nó para os cenários sem e com evidência (EVENTO – OCORRE). O impacto de cada estado, mostra o aumento ou a diminuição da probabilidade de ocorrer, medido pela razão entre o cenário com a evidência e o sem evidência. Os estados estão ranqueados do maior ao menor impacto entre cenários.

Tabela 3 Probabilidades – Modelo de Acidente de Colisão de Aeronaves com Aves.

Nó	Estados	Com evidência (A)	Sem evidência (B)	Aumento da Probabilidade (A/B)*100	Impacto	*Ranking*
Evento	Ocorre	1	2,6293E-05	-	-	-
Evento	Não ocorre	0	9,9997E-01	-	-	-
Parte Atingida	Fuselagem	3,46E-01	2,78E-01	124,41%	24,41%	1º
Fase de voo	Pouso	7,55E-01	6,11E-01	123,71%	23,71%	2º
Velocidade	Até 80kt	7,74E-01	6,66E-01	116,27%	16,27%	3º
Parte Atingida	Motor	2,61E-01	2,37E-01	110,01%	10,01%	4º
Altura AGL	Até 500ft	9,96E-01	9,17E-01	108,63%	8,63%	5º
Parte Atingida	Radome	2,59E-01	2,47E-01	104,74%	4,74%	6º
Comportamento da Espécie	Uma	9,30E-01	9,25E-01	100,50%	0,50%	7º
Massa da Espécie	Até 1500gr	9,60E-01	9,58E-01	100,26%	0,26%	8º
Horário	Noite	4,11E-01	4,11E-01	100,13%	0,13%	9º
Cobertura de Nuvens	Céu Claro	6,45E-01	6,45E-01	100,05%	0,05%	10º
Horário	Dia	5,89E-01	5,89E-01	99,91%	-0,09%	11º
Cobertura de Nuvens	Poucas Nuvens	2,37E-01	2,37E-01	99,90%	-0,10%	12º
Cobertura de Nuvens	Encoberto	1,18E-01	1,18E-01	99,90%	-0,10%	13º
Massa da Espécie	Maior 1500gr	3,97E-02	4,21E-02	94,15%	-5,85%	14º
Comportamento da Espécie	Duas ou mais	6,99E-02	7,45E-02	93,75%	-6,25%	15º
Velocidade	80 a 200kt	2,26E-01	3,16E-01	71,56%	-28,44%	16º
Parte Atingida	Para-brisa	9,97E-02	1,53E-01	65,24%	-34,76%	17º
Fase de voo	Decolagem	2,45E-01	3,89E-01	62,82%	-37,18%	18º
Parte Atingida	Asa	3,48E-02	8,50E-02	40,96%	-59,04%	19º
Altura AGL	500 a 3500ft	4,04E-03	6,19E-02	6,53%	-93,47%	20º
Altura AGL	Maior 3500ft	3,36E-04	2,16E-02	1,56%	-98,44%	21º
Velocidade	Maior 200kt	1,06E-04	1,85E-02	0,57%	-99,43%	22º

Conforme apresentado, os dez primeiros estados do *ranking* da Tabela 3 apresentam os maiores aumentos na probabilidade (mais de 100% de aumento) com a evidência da colisão com ave, em ordem de importância, tem-se: (1º) fuselagem atingida na colisão; (2º) colisão na fase de pouso; (3º) colisão até 80 nós de velocidade; (4)º motor atingido na colisão; (5º) colisão até 500 pés de altura; (6º) radome atingido na colisão; (7º) Uma ave atingida; (8º) Ave de até 1.500 gramas atingida; (9º) Colisão durante a noite e (10º) Colisão em condições de céu claro.

Este resultado demonstra que, quando há a evidência da colisão com ave, estes estados exercem maior impacto no modelo, ou seja, tem maior probabilidade de ocorrer, dado que a colisão ocorreu. Por exemplo, o estado 'fuselagem' do nó 'Parte atingida' diz que a fuselagem da aeronave tem 124,41% de ser a parte atingida em uma colisão com aves. Para os demais estados, observa-se que o impacto diminui (representado pelo sinal negativo).

Os estados com impacto positivo indicam que estes, são os fatores de maior risco no Brasil quando se considera um cenário com a evidência da colisão. Logo, o cenário com maior sensibilidade para que o evento ocorra, envolve: *a fase de pouso, aeronave com até 500 pés de altura e 80 nós de velocidade, envolvendo uma ave de até 1.500 gramas, durante a noite com céu claro, com maior possibilidade de atingir fuselagem, motor ou radome*.

Pode-se afirmar ainda que, os estados que apresentam impacto negativo, quando da evidência de colisão, apresentam menor probabilidade de ocorrer. Este fato, leva à compreensão de que, para as condições simuladas, os fatores e seus respectivos estados com maior impacto podem contribuir com o gerenciamento de segurança operacional de aeroportos no cenário de acidentalidade brasileiro.

A partir dos resultados, foram identificados os fatores críticos no Brasil envolvendo as colisões entre aves e aeronaves

comerciais: a fuselagem, como parte atingida mais crítica (1º), durante fase de pouso (2º), com velocidade até 80 nós (3º), o motor, como segunda parte atingida mais crítica (4º), até 500 pés (5º), o radome, como terceira parte atingida mais crítica (6º), envolve apenas uma ave (7º), massa de até 1.500 gramas (8º), durante a noite (9º) com céu claro (10º).

5. CONCLUSÕES

Com o intuito de quantificar o impacto dos principais fatores contribuintes que envolvem colisões aves na aviação comercial em fases de pouso e decolagem de voos, este estudo desenvolveu um modelo de acidente para a aviação capaz de obter os fatores críticos relacionados à operação considerando-os dentro das categorias ambiente, aves, aeronaves.

O método de redes bayesianas foi utilizado para modelagem e quantificação das probabilidades condicionais. A aplicação do modelo utilizando as redes bayesianas permitiu uma análise detalhada dos impactos dos fatores e seus estados identificando os que influenciam a ocorrência de colisão entre ave e aeronave. O levantamento dos fatores contribuintes realizadas por meio da literatura, acadêmica e normativa, foi fundamental na obtenção da informação primária à construção do modelo de acidente.

Na sequência, a partir do modelo, foi avaliado o impacto de cada estado, que mostra o aumento da probabilidade de ocorrer, medido pela razão entre o cenário com a evidência e o sem evidência. Os estados que apresentaram os maiores impactos são: (1º) fuselagem atingida na colisão; (2º) colisão na fase de pouso; (3º) colisão até 80 nós de velocidade; (4º) motor atingido na colisão; (5º) colisão até 500 pés de altura; (6º) radome atingido na colisão; (7º) uma ave atingida; (8º) ave de até 1.500 gramas atingida; (9º) colisão durante a noite; e, (10º) colisão em condições de céu claro. Este resultado indica que, quando há a evidência da colisão com ave, estes estados exercem maior impacto no modelo, ou seja, tem maior probabilidade de ocorrer, dado que a colisão ocorreu.

Sendo assim, o cenário com maior sensibilidade para que o evento ocorra, envolve a fase de pouso, aeronave com até 500 pés de altura e 80 nós de velocidade, envolvendo uma ave de até 1.500 gramas, durante a noite com céu claro, com maior possibilidade de atingir fuselagem, motor ou radome.

Ressalta-se que os resultados encontrados são relevantes para o contexto da aviação que apresenta crescimento do transporte aéreo e do ponto de vista de que as ocorrências envolvendo aeronaves e aves são um dos mais repetitivos na aviação. Os resultados encontrados podem contribuir com o processo de gerenciamento de risco realizado pelos órgãos de interesse, sejam operadores aeroportuários, agências de aviação civil, centro de investigação de acidentes, companhias aéreas, institutos de pesquisa, entre outros.

Destaca-se também o Modelo de Acidente como ferramenta de análise para os demais atores, a exemplo das companhias aéreas que o podem utilizar como medida de apoio no gerenciamento de segurança operacional bem como, na prevenção de acidentes e custos decorrentes.

6. REFERÊNCIAS

ABEAR. (2016). Voar por mais Brasil: Os benefícios da aviação nos estados. Em Associação Brasileira das Empresas Aéreas. https://abear.com.br/wp-content/uploads/2019/03/ABEAR_VoarPorMaisBrasil_2016.pdf

Allan, J. (2006). A heuristic risk assessment technique for birdstrike management at airports. *Risk Analysis*, *26*(3), 723–729. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00776.x

Allan, J., Baxter, A., & Callaby, R. (2016). The impact of variation in reporting practices on the validity of recommended birdstrike risk assessment processes for aerodromes. *Journal of Air Transport Management*, *57*, 101–106. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.07.012

Azabache-Requena, J. A., & Marcial-Ramos, R. (2019). Análisis de peligro aviario en el Aeropuerto Guillermo Concha Iberico, Piura, Perú. *Boletín UNOP*, *14*, 19–28. https://boletinunop.weebly.com/uploads/6/2/2/6/62265985/boletin_unop_vol._14_n%C2%B01_2019_-_azabache.pdf

Bandeira, M., Correia, A., Martins, M. (2018). General model analysis of aeronautical accidents involving human and organizational factors. Journal of Air Transport Management 69, 137–

146. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.01.007

Bandeira, M., Correia, A., Martins, M. (2017). Method for measuring factors that affect the performance of pilots. Transportes 25 (2), 156–169. http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1374.

Blokpoel, H. (1976). *Bird hazards to aircraft: problems and prevention of bird/aircraft collisions*. Clarke, Irwin & Co. https://canadianbirdstrike.ca/wp-content/uploads/2018/02/Blokpoel_1976-1.pdf

CENIPA. (2017). Manual de gerenciamento de risco de fauna MCA 3-8. Em *Comando da Aeronáutica. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos*.

CENIPA. (2020). *Plano básico de gerenciamento de risco de fauna PCA 3-3*. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Comando da Aeronáutica. Assessoria de Gerenciamento de Risco de Fauna.

CENIPA. (2021). Anuário de Risco de Fauna 2011-2020. Em *SANTOS, L. C. B.; SOUZA, M. D. S. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos.*

Cleary, E. C., & Dolbeer, R. A. (2005). Wildlife Hazard Management at Airports - A Manual for Airport Personnel. Em *Federal Aviation Administration: Vol. Second Edition*. https://www.faa.gov/airports/airport_safety/wildlife/resources/media/2005_FAA_Manual_complete.pdf

Dolbeer, R. A. (2000). Birds and aircraft: fighting for airspace in crowded skies. *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference*, *19*(19). https://doi.org/10.5070/V419110122

Dolbeer, R. A. (2006). Height Distribution of Birds Recorded by Collisions with Civil Aircraft. *Journal of Wildlife Management*, *70*(5), 1345–1350. https://doi.org/https://doi.org/10.2193/0022-541X(2006)70[1345:HDOBRB]2.0.CO;2

EPL, & ONTL. (2022). Boletim de Logística: A importância do transporte aéreo para o Brasil. Em *Empresa de Planejamento e Logística S.A.; Observatório Nacional de Transporte e Logística*. https://ontl.epl.gov.br/publicacoes/boletins-de-logistica/

Ghazaoui, A., Lafif, M., Labzai, A., Rachik, M., & Bouyaghroumni, J. (2022). Mathematical modeling of aircraft bird strikes and optimal control strategies. *International Journal of Dynamics and Control*. https://doi.org/10.1007/s40435-022-00934-4

Guedes, F. L., Aragão Júnior, W. R., Medeiros, R. de M., & Santos, M. F. da S. (2020). Relação entre aterro sanitário e risco aviário: estudo de caso no Aeroporto Internacional de Recife - PE. Em R. F. de Santana, W. R. Aragão Júnior, & S. G. El-Deir (Orgs.), *VI Congresso Brasileiro de Resíduos Sólidos* (p. 123–132). EDUFRPE: Gampe/ UFRPE. https://www.epersol.com.br/

Jeffery, R. F., & Buschke, F. T. (2018). Urbanization Around an Airfield Alters Bird Community Composition, but not the Hazard of Bird-Aircraft Collision. *Environmental Conservation*, *46*(2), 124–131. https://doi.org/10.1017/S0376892918000231

Krieg, M. L. (2001). *A Tutorial on Bayesian Belief Networks* (1º ed). DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory.

LABTRANS. (2023). *Evolução anual da movimentação de aeronave*. Secretaria Nacional de Aviação Civil. Hórus. Laboratório de Transporte e Logística. UFSC. https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/?auth=s#Movimentacao/Evolucao

Linnell, M. A., Conover, M. R., & Ohashi, T. (1999). Biases in bird strike statistics based on pilot reports. *Journal of Wildlife Management*, *63*, 997–1003. https://doi.org/https://doi.org/10.2307/3802814

Linnell, M. A., Conover, M. R., & Ohashi, T. J. (1996). Analysis of Bird Strikes at a Tropical Airport. *Source: The Journal of Wildlife Management*, *60*(4), 935–945.

Nimmagadda, S., Sivakumar, S., Kumar, N., & Haritha, D. (2020). Predicting airline crash due to birds strike using machine learning. *International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*, 1–4. https://doi.org/10.1109/AERO.2014.6836249

Oliveira, J. C. de. (2018). *Análise de cenários de acidentes aéreos utilizando redes bayesianas baseadas em especialistas* [Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)]. Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA.

OLIVEIRA, H. R. B. (2017). Metodologia de Avaliação Operacional de Risco de Fauna. Em *Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA)*.

Schumacher, L. N., & Henkes, J. A. (2020). Uma análise sobre o risco aviário na aviação brasileira. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, *9*, 906–926. https://www.skybrary.aero/index.php/Bird_Strike

Shaw, P., & Mckee, J. (2008). *Risk Assessment: quantifying aircraft and bird susceptibility to strike*. https://www.worldbirdstrike.com/images/Resources/IBSC_Documents_Presentations/Brasil/IBSC28_WP01.pdf

Soldatini, C., Georgalas, V., Torricelli, P., & Albores-Barajas, Y. V. (2010). An ecological approach to birdstrike risk analysis. *European Journal of Wildlife Research*, *56*(4), 623–632. https://doi.org/10.1007/s10344-009-0359-z

Zakrajsek, E. J., & Bissonette, J. A. (2005). Ranking the risk of wildlife species hazardous to military aircraft. *Wildlife Society Bulletin*, *33*(1), 258–264. https://doi.org/10.2193/0091-7648(2005)33[258:rtrows]2.0.co;2

DEFENSE AND SECURITY

Defense and Security involves studies related to new Drones/EVTOL applications and the security of air Transportation and its operation. Most of the authors are from the southeast of Brazil, from universities and government agencies.

This page intentionally left blank.

AB-INITIO PILOT TRAINING MODEL COMBINATING SCENARIO-BASED TRAINING WITH SIMULATOR AND REAL FLIGHT

Marcello Tambosi Possebon*
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Pós-Graduação em Segurança de Aviação e Aeronavegabilidade Continuada - MP-Safety

Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira
Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Engenharia de Transportes

*** Corresponding author e-mail address**: marcellopossebon@gmail.com

PAPER ID: SIT2265

ABSTRACT

Flight Training has a huge importance in a pilot`s career, as it is from there that their careers will begin. Over time, new aircraft were being created, each time having more advanced technologies, arising the need to evolve such flight training. From this, training based on flight simulation was implemented, with this new training possibilities were integrated, as well as bringing greater safety to the pilots, since risky maneuvers that before could only be trained in the real flight, can now be trained in the flight simulator. Also with these technological advances, there was a need to modify the training method, which was initially activated in the repetition of maneuvers, until an acceptable level of execution was reached. The evolution of this training was the Scenario-Based Training (SBT), where several structured situations are created with the aim of making the pilot student follow his decision-making process. The present work discusses how to combine the TBC and the flight simulator together with the real flight to bring greater efficiency to the training of a student pilot taking the Private Pilot (PPL) course. At this point the article shows a proposed syllabus that will be validated by questionnaires using the design science research.

Keywords: Flight Training, Flight Simulator, Scenario Based Training, ab-initio flight training, Private Pilot course.

1. INTRODUCTION

Flight training is the first step in a pilot's formation, it is in this step that he will acquire the basic technical and non-technical skills to deal with his career.

This foundation must be really solid, mitigating future problems that could occur if the formation was bad. One of the technical abilities that can be cited is the climb, turn and descent maneuvers, even upset recoveries. The non-technical ones are such as in-flight management.

Allerton (2009) told that in the beginning of aviation, the flight training was transferred between pilots in an informal way, sometimes forgetting to forward small tips about the flight experience. Since then, the aviation industry is searching for ways to evolve the training process, in this process, means such as flight simulators and scenario-based flight training are being utilized and are the main focus of this paper.

2. FLIGHT TRAINING

2.1. Flight Instruction

In Brazil, the flight training is conducted based on syllabus that must be according with RBAC 61 (ANAC, 2020a) and IS 141-007 (ANAC, 2020b).

Anac requires at least 35 flight hours, and allows a maximum use of 5 hours of flight simulator training, but the flight school can choose if it will be used and where. Also, the main countries were also researched, and their data about flight training hours and simulator use are on Table 1.

The majority of the flight schools of Brazil uses a former syllabus called MCA 58-3 (Comando da aeronáutica, 2004) (Table 2).

MCA 58-3 which is composed by four phases of training, where on the first phase, called Pre-solo, is the first contact of the pilot with the aircraft, where he will learn how to take off an aircraft, climb, make turns, descent, land and how to manage an emergency in-flight. The pre-solo phase ends with the first solo flight of the student pilot.

The second phase is known as Improvement, where it is expected that the pilot learns more about the aircraft's limits and perform takeoffs and landings in fields with limited length or obstacles. In this step there are also some solo-training to increase the pilots self confidence.

After the improvement comes the navigation phase, where new airports will be introduced to the student and also on how to move from the origin airport to the destination one. And finally, is the night flying phase, that sometimes it is done apart from the normal structure or sometimes a mission in some of the previous phases, depending on where the pilot flies.

Table 1 Flight hours requirement for private pilot license around the world.

Aeronautical authority	Total hours	Hours with Flight Instructor	Solo flight hours	Flight simulator hours	Types of flight simulator used
ANAC	35 h	20 h	10 h	Max 5 h	ATD, FTD
FAA	35 h	20 h	5 h	Max of 15% of the flight time	FFS
				Max of 20% of the flight time	ATD
EASA	45 h	25 h	10 h	5 h	ATD, FTD
CASA	35 h	Do not specify	10 h	Do not specify	ATD, FTD

Table 2 Data about flight schools in Brazil.

CIAC	Totla of Training	Hours in Flight Simulator	Phase of flight sim adoption	Maneuvers done in sim	Flight simulator model	Type of flight simulator	Syllabus of reference
SAFE	46,5h	1,5h	End of the training	Basic IFR Maneuvers	SMGN20	AATD	Review 02 PPAP001
Aeroclube de São Paulo	41h	xx	Utilization on-demand	-	Redbird FMX, BR sim GA30	AATD	PPA Review 00
AeroTime	42,5h	5h	Pre-solo	Optional for repetition of maneuvers AFTER the real flight	BR simulations GA-18	AATD	PPA REV 00
Charlie 0	51,5h	5h	Pre-solo, Improvement e Navigation	2h on PS, 1h on AP, 2h on NAV	BR simulations GA-18	AATD	PPA Rev 00
Aeroclube de Santo Angelo	48h	5h	"Phase V"	Do not specify the maneuvers	Ecotroni ES-13	AATD	PPA Rev 00
Nav Treinamentos	50h	XX	Do not specify	Possibility of use to simulate different conditions weather and emergency	SBPA SIMULATORS & TECHNOLOGIES	AATD	PPA Rev 00
Aeroclube de Dourados	48,5h	7,5h	Fase 5	IFR Maneuvers	BR simulations GA-30	AATD	PPAP 001 A
Aeroclube de Guarapuava	43,5h	7,5h	Fase 5	IFR Maneuvers	MFSim Simuladores de Voo SMB58	AATD	PPAP 001 A

2.2. Flight Simulators

Minimal requirements for flight simulators are listed on ANACs requirement RBAC 60 (ANAC, 2020c) and IS 141-007 (ANAC, 2020b). These requirements divide the simulators in BATD, AATD, FSTD, FTD.

Each flight simulator type has its complexity and type of training. Also nowadays new technologies such as virtual reality or mixed reality headsets are being implemented in flight training.

Some studies have already been carried out with a focus on including training in simulators for initial students. Macchiarella, Brady, and Arban (2005) conducted a study to evaluate their university's training program.

The training program consisted of a curriculum with 60% of the training in a Frasca 172 flight simulation device (the C172), with a cabin and flight dynamics similar to the course's focus aircraft, part of the remaining 40% of the training.

For this study, the students, who had a maximum of 5 hours of flight time in a real aircraft, were separated into two groups, where one group would follow the already mixed training program (simulator + real aircraft); while the other group would only fly the aircraft. At the end of the study, the researchers concluded that there was actually greater effectiveness in the training of students who carried out the mixed training program, when compared to those who only flew the real aircraft.

In a subsequent study, Macchiarella, Arban and Doherty (2006) evaluated the effectiveness of transferring training from simulator sessions to real flight training.

For this, the study was carried out on the same flight and aircraft simulator model as Macchiarella, Brady and Arban (2005), a FRASCA 172 FTD with aerodynamic modeling very similar to that of the C172S, which was the aircraft used in the real flight part of the study. 38 students were needed in the initial phases of the flight, being separated into two groups, one with 18 students who carried out the training only on the aircraft;

and another with 20 students, which carried out the hybrid training program, combining flight simulator and real aircraft.

These authors ultimately deduced that knowledge transfer is the reason between the difference between the iterations of the control group of aircraft tasks (C) and the iterations of the experimental group of tasks performed (E) in relation to these iterations of the experimental group. of a simulator (EFTD).

2.3. Scenario Based Training (SBT)

With the development of onboard technology on new aircraft, the flight training needed to be improved, in the early days, these training was essentially based on maneuvers, where the pilot might complete then within certain specs. But nowadays the hole of in-flight management is needed, this is where the Scenario Based Training comes (Williams, 2011).

McMahon (2018) points that a simple scenario such as “taxi us to the main runway” or “follow that river” can be made during initial flight training and will be important in the future.

3. METHODS

The development of this work, represented by Figure 1.

It was carried out through a qualitative study using as a basis documentary and academic research on the use of flight simulators during training, their use in initial instruction or also at different levels of an aeronautical career, research the regulations available in the various aeronautical authorities in the countries.

This paper will use the Design Science Research (DSR) method to create an ab-initio flight training syllabus that combine the flight simulator and scenario-based training with real flight training. For this, Kuechler and Vaishnavi (2008) points that is necessary to first be aware of what is the problem, then in the next step some suggestions can be made about this training syllabus, during the development process of DSR, the initial design of the project will be made and then evaluated, in this case using a semi-structured interview with flight instructors and flight students, then based in these results, the final product will be modified and presented.

The Figure 1 shows the proposed path to the final model of the work, where a data acquisition was made, then a research on how the Brazilian CIACs are doing flight training and a research about flight simulators.

Figure 2 shows the ANAC’s RBAC 141 system, where information about CIACs syllabus were gathered.

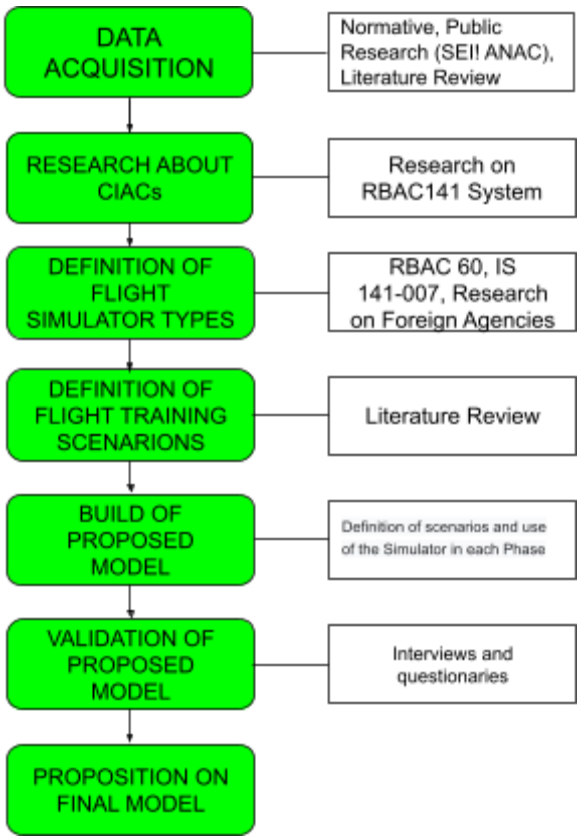


Figure 1 Proposed path.

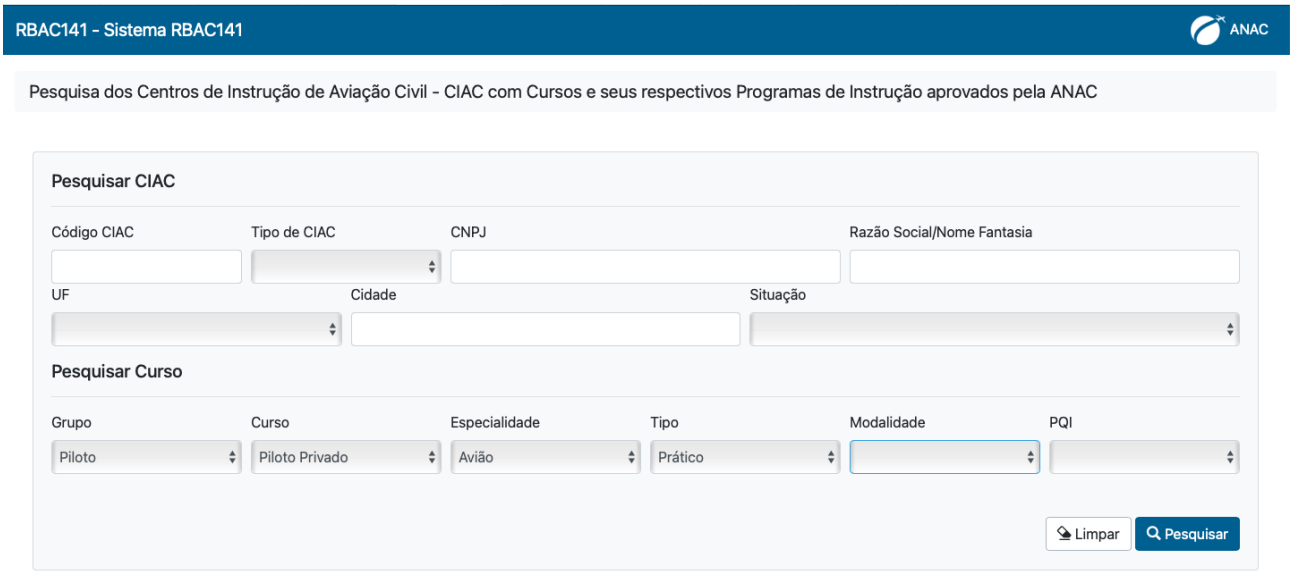


Figure 2 show the ANAC's RBAC 141 system.

During the first step of this study, along with the literature review, this is the proposed syllabus, where the phases of the training (PS, AP, NV, NO) have each one a scenario to be used (yellow box), a flight simulator use (orange box) and the real flight training part (green box).

Following the proposed syllabus a semi-structured questionnaire will be made, where flight instructors and alumni will be questioned about their experience using a flight simulator device and what they think about the suggested structure and based on their suggestions an improved syllabus will be made.

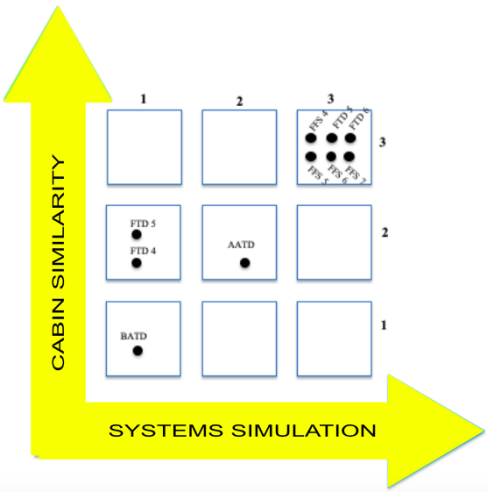


Figure 3 Cabin similarity X Systems Simulation

Figure 4 compares the External view on Y axis with the Flight Handling on X axis.

4. RESULTS

The following figures shows the comparative analysis of the flight simulators, which compares then in various aspects.

Figure 3 compares the similarity with the cabin on the Y axis and System simulations on X axis.

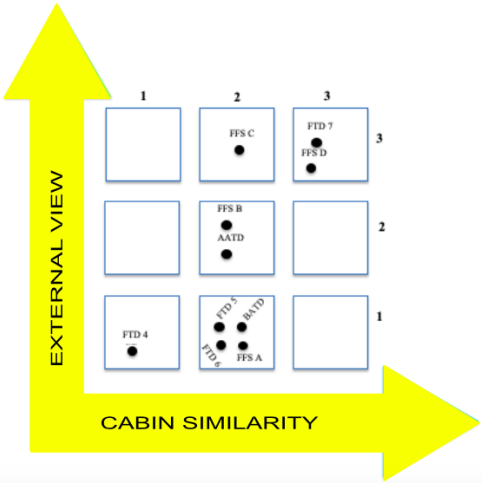


Figure 4 External view X Flight Handling

On Figure 5, Flight Handling was compared with System simulations.

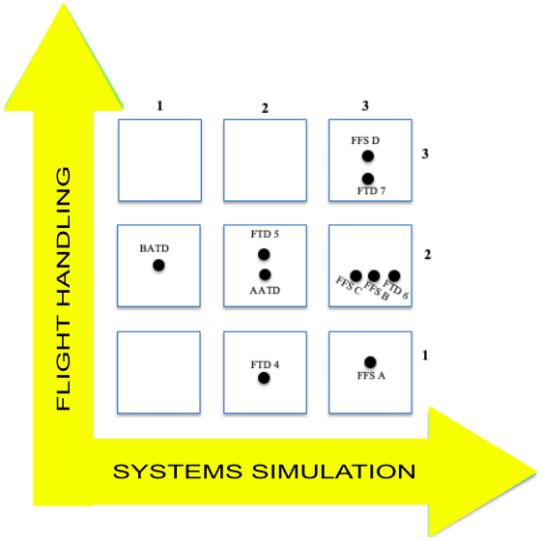


Figure 5 Flight Handling X Systems Simulation

Based on the state of the art use of the flight simulators along with the flight training, the following image shows the proposed syllabus, witch will be modified after the results from the questionnaire.

This proposed syllabus utilizes a former syllabus developed by brazilian DAC MCA 58-3 (Comando da aeronautica, 2004) with modifications in the use of the Flight Simulator and Scenario Based Training, as shown in Figure 6.

The former syllabus used only a task based training approach and wasn't helpful in the hole of managing the flight operation, only in doing some maneuvers to teach the pilot on how to fly.

Using a Scenario Based Training the pilot can learn how to do the maneuvers and also how to manage the flight, such as what to do in case of a medical emergency or their destination airport is closed. This scenarios will be shown in each of the phases of the syllabus.

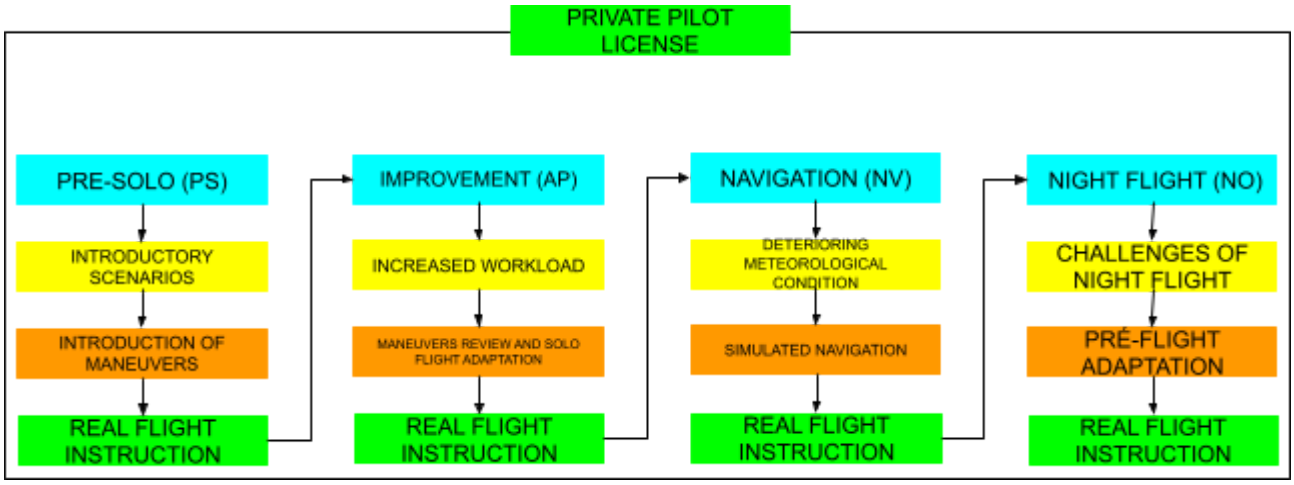


Figure 6 Proposed syllabus.

The use of Design Science research on this article was helpful because it came in first idea as the Figure 6 and then this proposition will be validated by means of a semi-structured questionnaire performed by flight instructors and flight students that have used a flight simulator in some time in their career.

5. FINAL CONSIDERATIONS

It is important to mention that the research about the flight simulator types played a very important role in this paper, because by this we could understand the differences between then and know in better in which phases each flight simulator could be used.

When we compare this new syllabus with the use of the flight simulator and the

scenario based training we can develop even more the pilot's hability to manage the flight, like a situation of a medical emergency or a destination airport closed can be put in the training program.

This paper isn't finished yet, a semi-structured interview will be done to acknowledge if the premisses about the steps and simulator use in the phases are coherent and what can be changed to improve this syllabus.

REFERENCES

ALLERTON, David. **Principles of Flight Simulation.** 1 ed. S.l.: Wiley-Blackwell, 2009. ISBN: 9780470682197. from: https://www.perlego.com/book/2773352/principles-of-flight-simulation-pdf..

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. **RBAC nº 61 emd 13:** LICENÇAS, HABILITAÇÕES E CERTIFICADOS PARA PILOTOS. S. l: ANAC. 2020a. 77 p. from: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-61/@@display-file/arquivo_norma/RBAC61EMD13.pdf. retrieved: 12 ago. 2022.

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. **IS 141-007C:** Programas de Instruções e Procedimentos e Manual de Instruções e Procedimentos.. S.l: ANAC. 2020b. 509 p. from: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-141-007c. retrieved: 01 jul. 2023.

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil. **RBAC nº 60 EMD 00:** REQUISITOS PARA QUALIFICAÇÃO E USO DE DISPOSITIVOS DE TREINAMENTO PARA SIMULAÇÃO DE VOO. s.l: ANAC. 2020c. 113 p. from: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-60/@@display-file/arquivo_norma/RBAC60EMD00.pdf. Retrieved: 26 nov. 2022.

COMANDO DA AERONÁUTICA - MINISTÉRIO DA DEFESA. **MCA 58-3:** MANUAL DO CURSO PILOTO PRIVADO - AVIÃO. S.l: COMAER. 2004. 191 p.

MACCHIARELLA, Nickolas D.; BRADY, Tim; ARBAN, Pamela K.. HIGH FIDELITY FLIGHT TRAINING DEVICES IN THE TRAINING OF AB INITIO FLIGHT STUDENTS. **24th Digital Avionics Systems Conference**, [s. l.], 2005. DOI: https://doi.org/10.1109/DASC.2005.1563375.

MCLEAN, Gregor M. T.; LAMBETH, Sandra; MAVIN, Tim. The Use of Simulation in Ab Initio Pilot Training. **The International Journal of Aviation Psychology**, [s. l.], v. 26, p. 36-45, 4 nov. 2016 DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1080/10508414.2016.1235364.

MCMAHON, Arlynn. **Train Like You Fly:** A Flight Instructor's Guide to Scenario-based Training. 1 ed. S.l.: Aviation Supplies & Academics, Inc., 2018. ISBN: 9781619547339. from: https://www.perlego.com/book/2041776/train-like-you-fly-a-flight-instructors-guide-to-scenariobased-training-pdf. Acesso em: 2 dez. 2022.

KUECHLER, Bill; VAISHNAVI, Vijay. On theory development in design science research: anatomy of a research project. **European Journal of Information Systems volume**, [s. l.], v. 17, p. 489-504, 18 nov. 2008 DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1057/ejis.2008.40.

WILLIAMS, Bruce. **Scenario-Based Training with X-Plane and Microsoft Flight Simulator:** Using PC-Based Flight Simulations Based on FAA-Industry Training Standards. 1 ed. S.l: Wiley, 2011. ISBN: 9781118233290. from: https://www.perlego.com/book/1014350/scenariobased-training-with-xplane-and-microsoft-flight-simulator-using-pcbased-flight-simulations-based-on-faaindustry-training-standards-pdf.

AÇÕES INTERAGÊNCIAS NA FISCALIZAÇÃO DO USO DOS DRONES NO BRASIL: CONSIDERAÇÕES À LUZ DO CÓDIGO BRASILEIRO DE AERONÁUTICA

EDUARDO ARAÚJO DA SILVA[1]
(UNIFA/DECEA)

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

eduardopedagogia@hotmail.com / eduvalle80@hotmail.com

PAPER ID: SIT2273

RESUMO

Tendo em conta o preconizado pela Lei nº 7.565/1986 (Código Brasileiro de Aeronáutica), no que concerne às providências administrativas cabíveis para os casos de infrações aos preceitos contidos na norma, bem como às legislações complementares que vigoram sob a égide dos órgãos reguladores nacionais acerca dos drones, e considerando a ausência de lei ordinária e específica que trate da competência com vistas às ações de abordagem e fiscalização, no tocante ao uso irregular ou ilícito do Sistema de Aeronaves Não Tripuladas (UAS) no território brasileiro, a finalidade precípua desta pesquisa se fulcra na análise das publicações federais, estaduais/distritais e municipais, as quais tratam de procedimentos que visam coibir a prática equivocada ou mal intencionada de um voo não tripulado. Busca-se apresentar um breve histórico da aviação, do tráfego aéreo e dos drones, um resumo do arcabouço regulatório com o objetivo de demonstrar que, se por um lado há previsão legal para a implementação de medidas mitigadoras que visam garantir a segurança da navegação aérea e de terceiros no solo e, também, a manutenção da ordem pública e da incolumidade das pessoas e do patrimônio, por outro, é possível que não haja uma diretriz preestabelecida estreitando os laços interagências. Ademais, apontar-se-ão ocorrências geradas por drones irregulares, e fatos que denotam o uso ilícito, ou no mínimo imperito, que causaram infrações penais, cíveis, administrativas, assim como lesões significativas às pessoas e ao patrimônio. Pretende-se identificar uma possível lacuna legislativa e a necessidade de se desenvolver novos mecanismos de ação, na figura jurídica da delegação de competência, em prol da regulamentação efetiva quanto às tarefas interagências, envolvendo as Autoridades Aeronáutica e de Aviação Civil, os órgãos da Segurança Pública, de Inteligência e Fiscalização, com o fito de formalizar a incumbência compartilhada, para atuarem na vigilância, apuração e controle do segmento não tripulado nacional.

Palavras-chave: aeronaves não tripuladas, drones, fiscalização, ordem pública, segurança pública.

[1] Doutorando em Ciências Aeroespaciais pelo PPGCA da UNIFA. Mestre em Educação pelo PPGEduc da UFRRJ. Especialista em Direito Militar (UCAM) e Educação Tecnológica (CEFET/RJ). Bacharel em Segurança Pública (UFF) e Graduado em Pedagogia (FIC) e Gerenciamento de Tráfego Aéreo (CIAAR). Chefe da Seção de Coordenação e Controle de UAS do Subdepartamento de Operações (SDOP) do DECEA, Inspetor de Segurança Operacional do Controle do Espaço Aéreo (InspCEA). Possui o Curso de Políticas Estratégicas frente às Ameaças Complexas pela Escola Superior de Guerra (ESG). É Capitão Especialista em Controle de Tráfego Aéreo da Força Aérea Brasileira (FAB).

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

ABSTRACT

Taking into account the provisions of Law no. 7. 565/1986 (Brazilian Aeronautics Code), with regard to the administrative measures applicable in cases of infractions of the precepts contained in the standard, as well as the complementary legislation in force under the aegis of the national regulatory bodies regarding drones, and considering the absence of an ordinary and specific law that deals with competence with a view to approach and inspection actions, with regard to the irregular or illicit use of Unmanned Aircraft System (UAS) in Brazil, the main purpose of this research is to analyze federal, state/district and municipal publications, which deal with procedures aimed at curbing the mistaken or malicious practice of unmanned flight. The aim is to present a brief history of aviation, air traffic and drones, a summary of the regulatory framework with the aim of demonstrating that, while on the one hand there is legal provision for the implementation of mitigating measures aimed at guaranteeing the safety of air navigation and third parties on the ground, as well as maintaining public order and the safety of people and property, on the other hand, it is possible that there is no pre-established guideline tightening interagency ties. In addition, we will point out occurrences generated by irregular drones, and facts that denote their illicit use, or at the very least imperfect use, which have caused criminal, civil and administrative infractions, as well as significant injuries to people and property. The aim is to identify a possible legislative gap and the need to develop new mechanisms of action, in the legal form of delegation of competence, in order to effectively regulate the interagency tasks, involving the Aeronautical and Civil Aviation Authorities, the Public Security, Intelligence and Inspection bodies, with the aim of formalizing the shared attribution, to act in the surveillance, investigation and control of the national unmanned segment.

Keywords*: unmanned aircraft, drones, inspection, public order, public security.*

RESUMEN

Considerando lo dispuesto en la Ley no. 565/1986 (Código de la Aeronáutica Brasileña), en lo que se refiere a las medidas administrativas aplicables en caso de infracción a los preceptos contenidos en la norma, así como la legislación complementaria vigente bajo la égida de los órganos reguladores nacionales en materia de drones, y considerando la ausencia de una ley ordinaria específica que trate de la competencia para las acciones de aproximación e inspección con relación al uso irregular o ilícito de Sistema Aéreo no Tripulado (UAS) en territorio brasileño, el objetivo principal de esta investigación es analizar las publicaciones federales, estaduales/distritales y municipales, que tratan de procedimientos destinados a frenar la práctica errada o maliciosa del vuelo no tripulado. El objetivo es presentar una breve historia de la aviación, el tráfico aéreo y los drones, un resumen del marco normativo con el fin de demostrar que, si bien por un lado existe una disposición legal para la aplicación de medidas paliativas destinadas a garantizar la seguridad de la navegación aérea y de terceros en tierra, así como el mantenimiento del orden público y la seguridad de las personas y los bienes, por otro lado es posible que no exista una directriz preestablecida que estreche los lazos interinstitucionales. Además, señalaremos sucesos generados por drones irregulares, y hechos que denotan su uso ilícito, o cuando menos imperfecto, que han causado infracciones penales, civiles y administrativas, así como importantes daños a personas y bienes. Se trata de identificar una posible laguna legislativa y la necesidad de desarrollar nuevos mecanismos de actuación, en la forma jurídica de delegación de competencias, a favor de una regulación eficaz de las tareas interinstitucionales, implicando a las Autoridades Aeronáuticas y de Aviación Civil, a los órganos de Seguridad Pública, Inteligencia e Inspección, con el objetivo de formalizar la tarea compartida de actuación en la vigilancia, investigación y control del segmento no tripulado nacional.

Palabras clave*: aeronaves no tripuladas, drones, inspección, orden público, seguridad pública.*

1. INTRODUÇÃO

O artigo 11 da Lei nº 7.565/86, conhecida como Código Brasileiro de Aeronáutica (CBA), expressa que a União exerce completa e exclusiva soberania sobre o espaço aéreo acima de seu território e mar territorial. Cabe à Força Aérea Brasileira (FAB), por meio do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), planejar, gerenciar e controlar as atividades relacionadas ao tráfego aéreo.

Outros órgãos também regulam a aviação nacional, cada um na sua área de atuação.

De forma sumária, conforme prevê a Lei nº 11.182/05, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) normatiza, regula e fiscaliza as atividades de aviação civil e de infraestrutura aeronáutica e aeroportuária, atuando sobretudo no escopo da segurança técnica desse setor.

Incumbe à Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) organizar a exploração dos serviços de telecomunicações no território brasileiro, desenvolvendo e aplicando a política nacional para o segmento. Observando-se a Lei nº 9.472/97, é possível reconhecer como função da instituição o disciplinamento e a fiscalização do uso do espectro de radiofrequências, inclusive das telecomunicações aeronáuticas.

As aeronaves não tripuladas, além reguladas por essas entidades, são normatizadas por outros órgãos, como o Ministério da Defesa (MD) e o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), no que se refere ao aerolevantamento e uso dos drones em operações aeroagrícolas, respectivamente.

O crescimento exponencial da utilização dos drones no Brasil já se tornou indiscutível, basta notar os números contabilizados pelo Sistema para solicitação de acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro por Aeronaves Não Tripuladas (SARPAS) do DECEA.

Gráfico 1: Solicitações de Voos no SARPAS por Ano

Fonte: DECEA.

Como visto no Gráfico 1, em 2016, ano de criação do SARPAS, foram somadas 95 solicitações de voo; contudo, no ano de 2022, o sistema contabilizou aproximadamente 311.000 pedidos oficiais. Segundo consulta feita ao Departamento, em novembro de 2023, os números já chegam a 336.000, apontando o contínuo avanço do setor.

No que tange ao acesso ao espaço aéreo, toda essa demanda é tratada de forma regionalizada, de acordo com as áreas de jurisdição dos Órgãos Regionais do DECEA, que são os Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo e o Centro Regional de Controle do Espaço Aéreo Sudeste.

Figura 1: Solicitações de Voos por Jurisdição Regional

Fonte: DECEA.

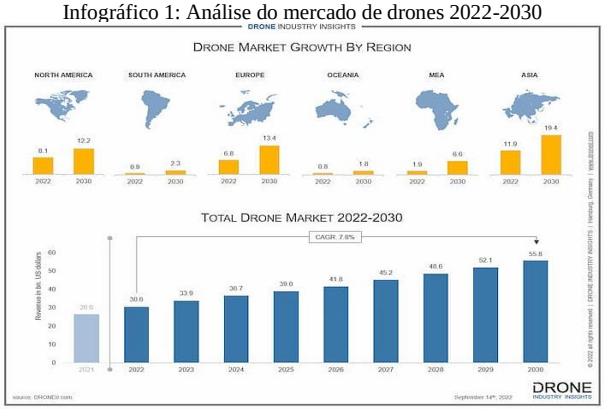
Vê-se na Figura 1 que, em termos de solicitações de voos, a região que compreende Rio de Janeiro e São Paulo concentra o maior volume. Até o ano de 2022, foram somadas aproximadamente 290.000 operações nessa área.

É certo que esse crescimento contínuo do emprego dos drones, nas atividades mais diversas, não é exclusivo ao Brasil.

Em escala global, o mercado de drones já valia cerca de 30 bilhões de dólares no ano passado, com previsão de aumento anual de 7,8% até 2030.

O Infográfico 1 a seguir representa essa projeção.

Infográfico 1: Análise do mercado de drones 2022-2030



Fonte: *Drone Industry Insights*.

Em meio a tantos voos, é possível que operações irregulares também ocorram, pelo descumprimento das normas relativas aos cadastros, licenças e acesso ao espaço aéreo, ou pelo emprego ilícito dos drones, o que requer a atuação dos elos competentes no tocante à fiscalização e aplicação de medidas sancionatórias, no sentido de não somente punir irregularidades cometidas, mas, também, coibir as práticas infracionais futuras, em prol da segurança da aviação e de terceiros no solo.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

O artigo 8º da Convenção de Aviação Civil Internacional (CACI) prevê que não poderá uma aeronave sem piloto sobrevoar o território de um Estado contratante, a não ser que haja autorização especial para o voo.

Cada Estado contratante se compromete a tomar as disposições necessárias para que o voo sem piloto de tal aeronave nas regiões acessíveis de aeronaves civis seja controlado, de modo a evitar todo perigo para as aeronaves civis. (OACI, 1944)

Em nosso país, para o caso de ocorrer infração aos preceitos do CBA, versa o artigo 289 do Código que a autoridade aeronáutica poderá tomar as seguintes providências administrativas: multa; suspensão e cassação de certificados, de licenças ou de autorizações e detenção, interdição ou apreensão de aeronave, ou do material transportado.

Concomitante ao dispositivo, o artigo 290 dessa Lei prevê que *a autoridade aeronáutica poderá requisitar o auxílio da força policial para obter a detenção dos presumidos infratores ou da aeronave que ponha em perigo a segurança pública, pessoas ou coisas*.

No que se refere ao espaço aéreo brasileiro, cabe à Junta de Julgamento da Aeronáutica (JJAER), com base na Portaria nº 258/JJAER, de 10 de dezembro de 2018, *apurar e aplicar as penalidades e providências administrativas previstas no CBA e na legislação complementar, por condutas que configurem Infrações de Tráfego Aéreo*.

Quanto à ordem pública, o artigo 2º do Decreto nº 88.777/83 a define como sendo (...) *um conjunto de regras formais, que emanam do ordenamento jurídico da Nação, tendo por escopo regular as relações sociais de todos os níveis, do interesse público, estabelecendo um clima de convivência harmoniosa e pacífica, fiscalizado pelo poder de polícia, e constituindo uma situação ou condição que conduza ao bem comum*. (BRASIL, 1983)

De acordo com o artigo 144 da CF/88, *a segurança pública é dever do Estado, direito e responsabilidade de todos, devendo ser exercida para a preservação da ordem pública e da incolumidade das pessoas e do patrimônio*.

No ordenamento jurídico brasileiro, percebe-se um conjunto de dispositivos que fazem referências a tipificações já aplicadas para os casos de voos irregulares de drones, como, por exemplo, os artigos 33 e 35 do Decreto-Lei nº 3.688/41 que, respectivamente, tratam como Contravenções Penais "dirigir aeronave sem estar devidamente licenciado" e "entregar-se na prática da aviação, a acrobacias ou a voos baixos, fora da zona em que a lei o permite, ou fazer descer a aeronave fora dos lugares destinados a esse fim".

Nesse mesmo caminho, o Código Penal (Decreto-Lei nº 2.848/40) prevê como Crime "expor a vida ou a saúde de outrem a perigo direto e iminente" (artigo 132) e "expor a perigo embarcação ou aeronave, própria ou alheia, ou praticar qualquer ato tendente a impedir ou dificultar navegação marítima, fluvial ou aérea" (artigo 261). Neste último, nota-se que um simples 'ato tendente' já configura o ilícito.

Consoante o artigo 186 do Código Civil (Lei nº 10.406/02), "aquele que, por ação ou omissão voluntária, negligência ou imprudência, violar direito e causar dano a outrem, ainda que exclusivamente moral, comete ato ilícito".

O rol de dispositivos não é taxativo, visto que podem coexistir outros legalmente aplicáveis, como os que envolvem lesão corporal, invasão de privacidade, tráfico de drogas, crimes militares, danos e até homicídios.

3. QUESTÃO PROBLEMA

As irregularidades com aeronaves não tripuladas não são tão recentes.

Em 2017, as operações aéreas foram suspensas por duas horas no aeroporto de Congonhas/SP, devido a um drone sobrevoando as proximidades do sítio. Em 2021, o mesmo caso ocorreu no aeroporto internacional de Brasília/DF, contudo, dessa vez, o piloto remoto foi identificado e abordado pela Polícia Federal.

Em 2022, houve uma série de ocorrências com drones irregulares. Na cidade de

Sapiranga/RS, foi apreendido um drone utilizado para entregar drogas em presídios. Em Uberlândia/MG, um drone de pulverização foi usado para arremessar fezes e urina sobre um evento de pré-candidatura eleitoral.

Na zona sul do Rio de Janeiro/RJ, foram flagradas entregas de drogas com uso de drones diretamente em coberturas de apartamentos.

Ainda, em 2022, durante um evento no Distrito Federal, um drone atingiu uma mulher acima de um dos seus olhos. O acidente gerou lesão corporal e a vítima precisou realizar procedimentos cirúrgicos de urgência.

Figura 2: Vítima de acidente com drone em show no DF

Fonte: www.metropoles.com.

Em 2023, as operações aéreas novamente foram suspensas, dessa vez em Guarulhos/SP, gerando riscos à segurança da aviação e prejuízos às companhias aéreas e administração do aeroporto, pois alguns voos tiveram que ser alternados para outro aeródromo.

Apenas como mais um exemplo, há dois anos, um drone de pequeno porte colidiu com um helicóptero da Aviação Naval da Armada do Chile. O choque ocasionou a quebra do *plexiglass* do pára-brisa e alguns ferimentos leves a um dos tripulantes. A aeronave precisou pousar em emergência.

Figura 3: Helicóptero Bell 206B Jet Ranger III e DJI Mavic Air II

Fonte: Revista Força Aérea.

Definitivamente, um drone irregular, desconhecido ou malicioso, acessando o espaço aéreo sem as devidas documentações, ou sendo utilizado como meio para a prática de um ilício, precisa ser objeto de ação fiscalizatória.

De toda sorte, não há no Brasil uma legislação específica e ordinária que aponte as melhores medidas a serem tomadas por parte dos órgãos de segurança pública, ou daqueles atrelados à manutenção da ordem pública, da vida e da incolumidade das pessoas e do patrimônio, com procedimentos bem definidos e preestabelecidos.

4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Com o advento da Lei nº 11.182/05, a ANAC passou a ser considerada autoridade de aviação civil e, aparentemente, as questões voltadas para os cadastro de aeronaves, certificações de equipamentos e licenças dos pilotos remotos ficaram a cargo da Agência, ao passo que as matérias relativas ao controle do uso dos drones foram destinadas à autoridade aeronáutica, pelo menos quanto ao acesso ao espaço aéreo, na figura do DECEA.

O exposto no artigo 290 do CBA denota a possibilidade de a autoridade aeronáutica ‘requisitar o apoio da força policial’ para os casos de atuarem na fiscalização quanto às infrações aos preceitos da norma, conforme já foi explicitado anteriormente.

Em questões de ordem pública, observa-se que são os órgãos de segurança que agem diretamente de forma a garantirem a incolumidade de pessoas e do patrimônio, assim como fiscalizam, mediante previsão normativa, irregularidades atinentes a outras atividades.

Ocorre que, atualmente, não há um entrelaçamento de diretrizes e condutas que assegurem um procedimento operacional padronizado, para que as irregularidades sejam tratadas de maneira sequencial e vinculada.

Um exemplo disso é a dúvida que alguns agentes de segurança possuem sobre abordagem e fiscalização. Por vezes, os órgãos reguladores se deparam com questionamentos sobre “o que deve ser feito em relação ao drone” nos casos do seu emprego envolvendo atividades ilícitas.

Do mesmo modo, os órgãos ainda não consagraram processos que ditem a devida tramitação de registros de voos que nitidamente violam normas em vigor e que podem ser ilícitos nos âmbitos cível e penal, assim como não se vê uma diretriz geral (*erga omnes*) que endosse o encaminhamento de práticas delituosas com uso

de drones aos órgãos que regulam o UAS.

Percebe-se que, com o passar do tempo, e dependendo da região, alguns órgãos acabam efetivando coordenações entre si; entretanto, em outros cenários, não acontece de modo similar.

Em 2021, o DECEA iniciou uma campanha educativa denominada "Workshop UAS para Órgãos de Segurança Pública", em que participam os entes do artigo 144 da Constituição, representantes das áreas de Inteligência e Fiscalização, e os órgãos reguladores da aviação não tripulada. Com esse programa, o Departamento tem sido capaz de prover instruções sobre Doutrina UAS, Planejamento, Normatização e Operações Correntes, Enquadramentos Jurídicos e Tutoriais com atualizações do SARPAS. É uma oportunidade ímpar de reunir todos os elos envolvidos com o sistema.

Já ocorreram três encontros presenciais; o primeiro no Rio de Janeiro, nas dependências do DECEA, com 40 participantes; o segundo em São Paulo, no CRCEA-SE, com 80 representantes dos órgãos; já o último foi realizado em Brasília, na sede da Agência Brasileira de Inteligência (ABIN), reunindo 160 membros do Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

De acordo com uma consulta feita ao setor de SAC do DECEA, após essa iniciativa, os chamados dos agentes de segurança pública do Sudeste apresentaram uma queda de 87%, o que demonstra o ganho operacional resultante das ações doutrinárias interagências.

Figura 4: 3º Workshop UAS para OSP na ABIN

Fonte: DECEA.

Mesmo que esses fomentos tenham um resultado significativo, ainda há espaço para melhorias e, sem sombra de dúvidas, a mais importante delas é a formalização dos procedimentos relacionados às ações de abordagem e fiscalização.

Justifica-se a pesquisa aprofundada sobre uma possível lacuna no conjunto das normas e, quiçá, um conflito de legislações, fazendo com que o uso irregular e ilícito seja um fator contribuinte para outros cometimentos rechaçados no ordenamento jurídico brasileiro.

A Tese objetiva propor a criação de uma legislação ordinária e específica, com vistas a trazer às forças coirmãs do artigo 144 da CF/88, bem como a outras agências, a possibilidade de procederem *ex officio* e com a formalidade que requer o rito regulamentar.

5. OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é analisar o provável hiato normativo existente quanto à responsabilização estatal, acerca da atividade de controle do uso dos drones no Brasil, buscando no instituto da delegação de competência, especificamente quanto ao artigo 290 do CBA, a fundamentação para que as ações interagências sejam regulamentadas, com a segurança jurídica suficiente aos membros do artigo 144 da Carta Magna de 1988, dos órgãos de Inteligência e de Fiscalização federal, dos estados e municípios.

Com relação aos objetivos específicos, buscar-se-á:

a) identificar as responsabilidades dos órgãos reguladores acerca da normatização e do controle do emprego dos drones, de acordo com suas áreas de atuação;

b) apontar os possíveis conflitos entre as normas publicadas em âmbito nacional por esses órgãos à luz do CBA;

c) descrever um estudo comparado entre as legislações, diretrizes e doutrinas nacionais e as recomendações internacionais dais quais o Brasil se faz signatário; e

d) identificar as competências dos órgãos que integram o artigo 144 da CF/88, visando propor a criação de legislação específica e ordinária para o tema.

6. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O presente artigo é uma minuta da Tese de Doutorado que se encontra em andamento no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Ciências Aeroespaciais (PPGCA), da Universidade da Força Aérea (UNIFA).

O estudo se baseia na imprescindibilidade de um debate acerca das competências que possuem os órgãos reguladores e de Segurança

Pública, de Inteligência e Fiscalização, para atuarem no controle das operações aéreas não tripuladas que possam infringir as normas.

Para Triviños (1987) o estudo descritivo tem como objetivo conhecer a realidade a partir da descrição de fatos e realidades.

Nesse sentido, Minayo (2000) ressalta que 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.

O trabalho aponta ocorrências que foram noticiadas por mídias sociais, outros estudos já realizados e autores que tratam do tema, com a finalidade de demonstrar a pauta no estado da arte, observando, na literatura, fatos levantados.

Num estudo de revisão integrativa, a pesquisa do tipo estado da arte tem inegável relevância, contribuindo para a concepção do pressuposto teórico de um campo do conhecimento.

Por meio das pesquisas de cunho integrativo, no estado da arte, experiências inovadoras podem ser identificadas e analisadas, possibilitando, por meio da análise das produções, alternativas para problemas específicos. (ROMANOWSKY e ENS 2006)

Dessa forma, frisa-se que o procedimento metodológico possui natureza exploratória, no campo da pesquisa qualitativa.

Levando-se em consideração a possibilidade de coexistirem modelos dispostos pela pesquisa quantitativa, o ensaio também objetiva apontar dados estatísticos e números estruturados, contribuindo para a conclusão da pesquisa e fomentando as produções futuras.

7. RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se, com a conclusão da pesquisa, demonstrar se realmente existe uma lacuna na conjuntura jurídico-normativa, quanto às ações a serem tomadas pelos órgãos de fiscalização, de modo geral, sobre o controle das operações aéreas não tripuladas no Brasil.

Ademais, vislumbra-se propor mecanismos de ação, na figura da delegação de competência, e em um cenário conjunto de tarefas interagências, envolvendo as autoridades aeronáutica e de aviação civil, forças nacionais constantes no rol da segurança pública e dos entes vinculados à ordem pública e à incolumidade das pessoas e do patrimônio.

Para tanto, a pesquisa proporá uma padronização dos procedimentos a serem implementados entre esses órgãos, com o objetivo de facilitar as tarefas quando o assunto se tratar de uso irregular de drones no país.

Por fim, espera-se que os resultados deste estudo, de cunho investigativo, possam suscitar reflexões posteriores, corroborando o aprimoramento de outros trabalhos e, da mesma forma, as tomadas de decisões colaborativas necessárias para a melhoria do segmento e da segurança do que mais importa: a sociedade.

Referências

AHMED, F., MOHANTA, J.C., KESHARI, A. *et al*. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. Arabian Journal for Science and Engineering 47:7963–7984 (2022). Disponível em https://doi.org/10.1007/s13369-022-06738-0. Acesso em 12 maio 2023.

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

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

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. RBAC-E nº 94. Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. 2021. Disponível em https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94. Acesso em 16 maio 2023.

____. Comando da Aeronáutica. DCA 1-1. Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira. Vol. I e II. 2020. Disponível em https://www.sislaer.fab.mil.br. Acesso em 11 maio 2022.

____. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Tráfego Aéreo. ICA 100-40. Rio de Janeiro, 2023. Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. Disponível em https://publicacoes.decea.mil.br. Acesso em 22 jul. 2023.

____. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Portaria nº 258/JJAER, de 10 de dezembro de 2018.

Disponível em https://jjaer.decea.mil.br/images/legislacao/Portaria_258_JJAER.PDF. Acesso em 15 set. 2023.

____. Decreto nº 88.777, de 30 de setembro de 1983. Aprova o regulamento para as policias militares e corpos de bombeiros militares (R-200). Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d88777.htm. Acesso em 15 set. 2023.

____. Lei nº 7.565, 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 2023.

____. Lei nº 9.472, de 16 de junho de 1997. Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional nº 8, de 1995. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9472.htm. Acesso em 15 set. 2023.

____. Lei nº 11.182, de 27 de setembro de 2005. Cria a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, e dá outras providências. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11182.htm. Acesso em 15 set. 2023.

____. Decreto-Lei nº 2.848, de 7 de dezembro de 1940. Código Penal. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del2848compilado.htm. Acesso em 15 set. 2023.

____. Decreto-Lei nº 3.688, de 3 de outubro de 1941. Lei das Contravenções Penais. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del3688.htm. Acesso em 15 set. 2023.

____. Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002. Código Civil. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/l10406compilada.htm. Acesso em 15 set. 2023.

CANADA. International Civil Aviation Organization. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). Doc 10019. 1st. ed. Montreal, 2015. Disponível em https://store.icao.int/en/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019. Acesso em 18 maio 2023.

CHICAGO. International Civil Aviation Organization. Convenção sobre Aviação Civil Internacional. Promulgada pelo Decreto-Lei nº 21.713, de 27 de agosto de 1946. Disponível em https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/decretos/decreto-no-21-713-de-27-08-1946/@@display-file/arquivo_norma/convencaoChicago.pdf. Acesso em 15 set. 2023.

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

COSTA, Rafaela Duarte. Análise da atuação dos Drones na Segurança de um País**.** Dissertação (Mestrado em Direito). Universidade de Lisboa. Lisboa, 2019.

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.

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

IGBAL, Mohammad. Use of Dynamic Remotely Operated Navigation Equipment (DRONE) in Geographical and Environmental Research: Bangladeshi Perspectives. 2021. Disponível em https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3922387. Acesso em 18 mar. 2023.

LESSA, Sávio. Artigo: O que é Segurança Pública? Portal Amazônia. 2021. Disponível em https://portalamazonia.com/seguranca-publica-e-cidadania/artigo-o-que-e-

seguranca-publica-1. Acesso em 12 mar. 2023.

MESQUITA, Ivan Muniz. O Poder Aeroespacial e a Estratégia Nacional de Defesa (END). Revista da Escola Superior de Guerra, v. 33, n. 67, p. 82-97, jan./abr. 2018. Disponível em https://revista.esg.br/index.php/revistadaesg/article/view/908. Acesso em 18 maio 2023.

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. Operações Aéreas Especiais: Drones, Busca e Salvamento e Resposta a Desastres. Monografia (Bacharelado em Segurança Pública e Social). DSP/InEAC/UFF. Rio de Janeiro, 2023.

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CERTIFICATION APPROACHES OF THE FAA AND EASA FOR VTOL AIRCRAFT: CASE STUDY OF BIRD STRIKE CERTIFICATION REQUIREMENTS

Maurício Antoniazzi*, Daniel Corrêa de Carvalho Lery, Ivan Resende Leitão, Marcelo Soares Leão, Cristiane Aparecida Martins
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

*** Corresponding author's e-mail address**: mauricio500@gmail.com

PAPER ID: SIT2255

ABSTRACT

Despite regulatory hurdles, vertical take-off and landing (VTOL) aircraft are expected to enter commercial service in the upcoming years. Until now, both leading aeronautical authorities, the United States of America (USA) Federal Aviation Administration (FAA) and the European Union Aviation Safety Agency (EASA), have presented different approaches to treat the issue. The FAA has changed its initial understanding of the proper certification path, deciding to follow the certification path of Special Class aircraft. At the same time, EASA has preferred to publish an entire set of publications as Special Conditions and Means of Compliance applicable to the VTOL aircraft. These approaches differ in their form and content. This means that differences in requirements can lead to different design solutions to be adopted by applicants, with potential implications on the industry development. A brief survey is also performed on other aeronautical certification authorities' approaches to VTOL aircraft certification. In the present work, a discussion is conducted regarding those issues, and the application of these approaches is presented in the case of the bird strike requirements applicable to VTOL aircraft. Considering that the industry is still in its early stages, it is expected that further changes occur in the applicable regulations with the future goal of harmonizing the rules between the certification authorities.

Keywords: Vertical Take-off and Landing (VTOL) Aircraft, Advanced Air Mobility (AAM), Aeronautical Certification, Federal Aviation Administration (FAA), European Union Aviation Safety Agency (EASA).

1. INTRODUCTION

New vertical take-off and landing (VTOL) aircraft are under development by many manufacturers worldwide, and they are the critical enablers of the Advanced Air Mobility (AAM) conceptual new market expected to develop in the upcoming years. However, the new designs and operational scenarios will bring new challenges for the industry, such as energy storage technology, remote piloting or autonomous operations technologies, air traffic management, and lack of proper infrastructure (Booz Allen Hamilton, 2018). Nevertheless, one challenge of fundamental importance is the certification basis applicable to the new VTOL aircraft.

The current designs of VTOL aircraft have different and unique features; consequently, they do not fully fit into existing certification regulations as fixed-wing or rotary-wing aircraft. For example, features such as distributed lift/thrust units used to generate powered lift and control and that the VTOL aircraft may not be able to perform an autorotation or a controlled glide in the event of a loss of lift/thrust are characteristics that make the new VTOL aircraft designs different from both fixed-wing or rotary-wing aircraft of today.

This fact caused much discussion among the authorities and the industry on which certification path to follow. The possible certification paths are: (a) follow the certification requirements applicable to traditional fixed-wing or rotary-wing aircraft and add special conditions requirements as necessary, (b) develop an entirely new set of requirements, or (c) treat them as a special class and create tailored requirements for each applicant.

The United States of America (USA) Federal Aviation Administration (FAA) and the European Union Aviation Safety Agency (EASA), the two leading aeronautical certification authorities, have presented different approaches to treat the issue.

Initially, the FAA utilized the certification path given by the 14 Code of Federal Regulations (CFR) § 21.17(a), utilizing the Part 23 requirements with additions and revisions as necessary (path "a"). However, that understanding changed, and today, the FAA uses the 14 CFR § 21.17(b) certification path (path "c"), which classifies the VTOL aircraft as Special Class, thus requiring that each applicant has its airworthiness requirements tailored and published for public comments.

EASA, on the other hand, preferred to publish an entire set of publications in the form of Special Conditions and Means of Compliance applicable to the VTOL aircraft, based on CS-23 with additions and revisions (path "b").

As their approach differs in form and content, it can lead to different design solutions to be adopted by applicants, with potential implications on the industry development.

Besides analyzing the different approaches taken by the FAA and EASA, a brief description of the current status of other selected aeronautical certification authorities is also performed.

The objective of the present work is to investigate the steps taken by both authorities that led to their current status, provide a brief description of the current status of other aeronautical certification authorities, and how their different approaches can impact the industry by analyzing the bird strike requirements as a study case.

2. METHODOLOGY

The methodology applied to this work is to perform documentary research of the published documents related to VTOL aircraft by the FAA and EASA. A brief review is also performed on a few selected aeronautical certification authorities: Brazil's Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), United Kingdom's (UK) Civil Aviation Authority (CAA), Australia's Civil Aviation Safety Authority (CASA), and China's Civil Aviation Administration of China (CAAC). Analyzing a study case of the bird strike requirements applicable to the VTOL aircraft complements the review.

3. CERTIFICATION AUTHORITIES' APPROACH REVIEW

3.1 The FAA Approach

The FAA adheres to one of two certification processes to approve a new aircraft design depending on whether the proposed type meets existing definitions and airworthiness standards. The current regulations cover three

categories: airplanes, rotorcraft, and balloons. If the new design falls within these categories, the FAA follows the process outlined in 14 CFR § 21.17(a) to determine the appropriate certification standards. In cases where the regulations do not cover certain novel features, the FAA applies special conditions. However, if the proposed design does not fit into existing categories, the FAA follows the 14 CFR § 21.17(b) path to designate it as a special class aircraft. In such cases, there are no individual special conditions as the entire project is considered a special class. The FAA is required to publish the entire airworthiness criteria in the USA Federal Register for public comment. This certification path is reserved for unconventional aircraft such as gliders, unmanned aerial systems (UAS), and powered-lift aircraft (USA Department of Transportation, 2023).

The 14 CFR § 21.17(b) certification path was initially developed in the 1980s to certify airships and gliders to fly in the USA. However, when a civilian model of a tiltrotor (the AW609, formerly from Bell Agusta Aerospace Company, now Leonardo Helicopters) was unveiled in the 1990s, the FAA decided that these types of powered-lift aircraft must also use the 14 CFR § 21.17(b) path (Hirschberg, 2022).

The current designs of VTOL aircraft have different and unique features; consequently, they do not fully fit into existing certification regulations. For many years, especially between 2018 and early 2022 (USA Department of Transportation, 2023), the FAA has applied the certification basis following 14 CFR § 21.17(a), following Part 23 (Airworthiness Standards: Normal Category Airplanes) certification rules and special conditions as required to VTOL applicants. Only VTOL aircraft without wings, such as multicopter designs, would follow the 14 CFR § 21.17(b) path, where powered-lift aircraft would fit (Hirschberg, 2022). That understanding came after the change of Part 23 from prescriptive to performance-based requirements (Amendment 64, which went into effect on 30 August 2017), intended to accommodate new technologies and innovative designs (Hirschberg, 2022).

However, that understanding changed. After several personnel changes at senior FAA executive levels, the FAA reversed its position to address the AAM integration into the USA National Airspace System (NAS) beyond just aircraft certification, including pilot certification and operations (USA Department of Transportation, 2023). In April 2022, the FAA concluded that even if the aircraft could be certified under Part 23, pilots could not. The reason behind this decision is the creation in 1997 of the powered-lift airman certification category to support the development of the civil tiltrotor (Hirschberg, 2022). Despite that, until recently, the FAA had yet to establish corresponding airworthiness standards and operational regulations for powered-lift aircraft and pilots (USA Department of Transportation, 2023).

On 14 June 2023, the FAA published a Notice of Proposed Rulemaking (NPRM) to establish the requirements for pilot certification and operation of powered-lift aircraft. Through the NPRM, the FAA plans to integrate the AAM into the NAS by proposing changes to federal regulations applicable to powered-lift pilots and instructors and temporary changes through a USA Special Federal Aviation Regulation (SFAR) that would supplement existing rules, create temporary alternatives for pilot's certification, remove operational barriers, and mitigate safety risks for powered-lift aircraft.

An SFAR is a mechanism that allows the regulatory agency to gain experience in any new type of operation while enabling limited operations, taking a more conservative safety approach initially, and then making the appropriate safety improvements and permanent changes to the applicable regulations. The proposed duration for the SFAR is ten years. Finally, the FAA will not propose establishing any new requirements for the type certification of powered-lift aircraft, nor is it proposing to revise existing type certification requirements. The FAA has determined that the existing aircraft certification requirements are sufficient to type certificate powered-lift aircraft as a special class under 14 CFR § 21.17(b) (FAA, 2023).

As per the FAA, this process allows to address the unique and nonconventional features of the powered-lift aircraft without the need for additional processes, such as special conditions or exemptions that would be required if the FAA used the airworthiness standards already in place. Under the special class process, the FAA designates applicable airworthiness requirements

as the certification basis for each aircraft design, including its engines and propellers. This designation of applicable airworthiness requirements may include provisions from the existing airworthiness standards applicable to normal category and transport category airplanes, normal category and transport category rotorcraft, aircraft engines, and propellers (Parts 23, 25, 27, 29, 33, and 35 respectively). It may also include unique airworthiness criteria explicitly developed for the individual product. The FAA will publish the proposed airworthiness criteria for each powered-lift aircraft seeking certification and explain its equivalency determination for public notice and comment (FAA, 2023). After the establishment of the certification basis, the FAA determines the means of compliance, which are the methods, tests, and procedures on how the company will demonstrate compliance with regulations, standards, and airworthiness criteria agreed upon in the first stage of the certification process (USA Department of Transportation, 2023).

3.2 The EASA Approach

EASA has received multiple requests for the type certification of VTOL aircraft. Without certification specifications for this aircraft type, EASA decided that a complete set of dedicated technical specifications as Special Conditions was the proper way to advance their product certification. The Special Conditions address the unique characteristics of these products and prescribe airworthiness standards for issuing the type certificate for person-carrying VTOL aircraft, with lift/thrust units used to generate powered lift and control (EASA, 2018).

Some of the unique features identified by EASA of the VTOL aircraft that differentiate them from traditional rotorcraft or airplanes and therefore justify a dedicated Special Condition include (a) distributed lift/thrust units used to generate powered lift and control, and (b) although hover flight may be possible, the aircraft may not be able to perform an autorotation or a controlled glide if a loss of lift/thrust occurs (EASA, 2018).

The Special Condition has been established considering the Certification Specifications (CS) 23 (Normal-Category Aeroplanes) Amendment 5 when the airworthiness requirements were changed from a prescriptive to a performance-based approach (in harmonization with FAA Part 23 Amendment 64 revision). Additions and modifications to the base text were performed as necessary to reflect the unique features of the VTOL aircraft designs (EASA, 2018), including integrating elements of CS-27 (Small Rotorcraft) where appropriate (EASA, 2019).

To base the decision of the creation of the Special Conditions, EASA has also considered that as the VTOL designs seeking aircraft certification present characteristics of fixed-wing aircraft, rotary-wing aircraft, or both, with a consequence that in most cases, EASA was not able to classify these new aircraft as being either a conventional airplane or a rotorcraft as covered by the existing certification specifications. Therefore, applying the certification specifications for airplanes (CS-23) or rotorcrafts (CS-27), depending on their similarities, and only adding some modifications would not ensure equal treatment to certification applicants. EASA considered that establishing a standard set of conditions will enable fair competition and clarity for potential applicants. In addition, it will allow EASA to view all aircraft with a Certification Basis based on the VTOL Special Condition as a “Special Category” aircraft. This classification will provide greater flexibility in the operational regulatory framework by enabling tailoring requirements to this aircraft type rather than using airplane or helicopter regulations (EASA, 2019). The VTOL Special Condition will apply to heavier-than-air aircraft in the small category, with lift/thrust units used to generate powered lift and control. The distinction from conventional airplanes is based on the VTOL capability of the aircraft. In contrast, the difference from traditional rotorcraft is based on distributed propulsion, precisely when more than two lift/thrust units provide lift during vertical take-off or landing.

EASA has decided to limit the scope of the VTOL Special Condition up to the CS-27 small rotorcraft limits, with a passenger seating configuration of 9 or less and a maximum certified take-off mass of 3,175kg or less. The passenger limit of 9 or less aligns with the CS-23 aircraft certification levels 1 to 3 (EASA, 2019).

EASA has also introduced two certification categories in the VTOL Special Condition, the

Basic and Enhanced, linked to the intended type of operations. Introducing this category differentiation allows proportionality in safety objectives. It enables the application of the highest safety levels to Category Enhanced to protect third parties when flying over congested areas and conducting commercial air transportation of passengers. VTOL aircraft certified in the Category Enhanced would have to meet requirements for continued safe flight and landing and be able to continue to the original intended destination or a suitable alternate vertiport after a failure. Whereas for Category Basic, only controlled emergency landing requirements would have to be met similarly to a controlled glide or autorotation. For this reason, the most stringent system safety objectives are assigned to the Category Enhanced, regardless of the number of occupants (EASA, 2019).

Due to two considerations, EASA has determined that the highest standards for system safety objectives would have to be considered for Category Enhanced. The first is the increased complexity introduced by the new distributed propulsion and corresponding advanced flight control systems. The second is based on the concept of operations of the new VTOL aircraft, where their operations will mostly occur over high-density urban areas for commercial transportation of passengers (EASA, 2019).

EASA has also worked on developing Special Conditions for the Electric/Hybrid Propulsion System (EHPS) applicable to the VTOL aircraft, which follows a similar approach to the VTOL Special Conditions. This ensures consistency between the certification requirements of the VTOL aircraft and those of the EHPS and, therefore, would contribute to properly integrating the propulsion system in the aircraft. The Special Condition for the EHPS is developed to provide certification requirements independently of the propulsion system design or architecture (EASA, 2021).

Finally, EASA has worked on the Proposed Means of Compliance for the VTOL Special Conditions and the Special Conditions for the EHPS. The Proposed Means of Compliance have been opened for public consultation and are now published as Accepted Means of Compliance by EASA (EASA, 2023).

3.3 Other Authorities Current Status

Despite the different approaches, the FAA and EASA are paving the way for the certification of the new VTOL aircraft. Other certification authorities are following the evolution of the discussion while also working on their regulations. A few authorities in this situation that are worth mentioning are ANAC (Brazil), CAA (UK), and CASA (Australia). CAAC (China) is a noteworthy case as it paves its path.

ANAC (Brazil) released a report with an overview of the AAM market, its impacts on the certification, and its current status on the path to certifying VTOL aircraft. ANAC informs that they are at the definition of the certification basis applicable to the VTOL aircraft, which is an early step until a type certificate can be issued to any applicant. ANAC also mentions an international effort to harmonize regulations among authorities, forming a working group among ANAC, FAA, EASA, and Transport Canada Civil Aviation (TCCA) to align directives toward the VTOL aircraft product certification (ANAC, 2023).

Since the UK left the European Union (on 31 December 2020), its CAA had to establish its set of regulations as, until that date, they were part of EASA (CAA, 2020). However, the UK CAA has informed that they will follow the EASA approach (adopting the Special Conditions for the VTOL aircraft). UK CAA also recognizes that harmonizing regulations among authorities is necessary not only to reduce industry costs and avoid duplicated work but also to maintain high levels of safety in the aviation industry (CAA, 2022).

CASA (Australia) is also working on its regulations and following the FAA and EASA steps. CASA expects to release certification regulations applicable to the VTOL aircraft and its required infrastructure (as vertiports) in the next few years. CASA mentions explicitly that the publication of their requirements depends on the FAA and EASA meeting their deadlines for the initial airworthiness certification publications (CASA, 2023).

CAAC (China) is following its steps and moving forward with VTOL aircraft certification with initiatives apart from what the FAA and EASA are doing. Many VTOL aircraft

manufacturers are operating in China, and one noteworthy manufacturer is EHang, with its Unmanned Aircraft Cloud System (UACS) (system developed for the operation of the VTOL aircraft) being approved by CAAC for trial operations. Besides that, EHang has performed over 9,300 trial flights, supervised by CAAC, for tourism, obtaining operational experience, and expanding its operations across China (EHang, 2023).

4. ANALYSIS AND DISCUSSION

4.1 Possible Impacts on the Industry

The FAA's decision to change the certification approach from 14 CFR § 21.17(a) – FAR Part 23 to 14 CFR § 21.17(b) – Special Class brought concerns to the industry. The two most important concerns are (a) possible delays in issuing their FAA Type Certificate and (b) harmonization of the requirements among certification authorities, which would affect most significantly companies planning to commercialize their VTOL aircraft in different markets (USA Department of Transportation, 2023).

EASA, on the other hand, has decided to adopt a certification approach aligned with the FAA's initial strategy and launched Special Conditions for VTOL aircraft based on CS-23, with revisions, additions, and integration of CS-27 whenever appropriate.

Those different approaches may lead to different requirements, ultimately leading to different design solutions if applicants decide to follow one set of requirements or the other. It may also happen where conflicting requirements may lead to design solutions that make it impossible to certify a particular aircraft with one authority if they have already followed the requirements of another. Another possibility is that applicants may follow the most stringent requirements from both authorities if they plan to commercialize their products on both markets and markets that follow those authorities.

4.2 Case Study: Bird Strike Certification Requirements

The case studied by Cardoso, de Oliveira and Godoy (2022) compares the bird strike requirements between the FAA and EASA, applicable to VTOL aircraft. Some of the differences found are (a) bird mass to be considered (0.9kg for the FAA and 1.0kg for EASA), (b) which aircraft structures to consider in the analysis, (c) aircraft speeds and altitudes, and (d) if multiple bird strikes should be considered or not.

The differences can lead to different design solutions and highlight the importance of harmonized requirements among the certification authorities. More important than that, following one set of requirements may avoid obtaining the certification with the other authority due to significant differences, making it impossible to compete in specific markets. Or to find a competitor who decided to follow only one set of requirements from a particular authority and have a lighter, less expensive design than another competitor who chose to implement requirements from both authorities and will eventually have a more costly and heavier product, thus jeopardizing competition.

4.3 Bird Strike Requirement Analysis on VTOL Aircraft Under Certification with the FAA

Currently, there are two VTOL aircraft that had their Special Class Airworthiness Criteria, following the 14 CFR § 21.17(b) certification path, already published by the FAA: (a) Model M001 Powered-Lift by Archer Aviation Inc. (FAA, 2022a), and (b) Model JAS4-1 Powered-Lift by Joby Aero, Inc. (FAA, 2022b). A comparison analysis of the certification requirements applicable to those aircraft designs related to bird strikes and the previous case study is performed.

The bird strike requirements analyzed are identical for both VTOL aircraft designs. The FAA recognizes that the threat from bird strikes in the environment where VTOL aircraft are intended to operate is harsher than the environment in which rotorcraft or normal-category airplanes operate today. The VTOL aircraft will operate at lower altitudes and, due to their design characteristics, will be much quieter than conventional helicopters. As a result, birds will have fewer cues to the existence of the aircraft due to quiet approach environments. These factors combined increase the aircraft's

exposure to birds (FAA, 2022a, 2022b).

Based on the research reported by the Aviation Rulemaking Advisory Committee (ARAC) Rotorcraft Bird Strike Working Group (RBSWG), the FAA proposes a bird impact size of 1.0kg, consistent with rotorcraft industry testing. The applicant must evaluate the aircraft design to determine what parts are exposed to potential bird strikes and ensure that the aircraft can continue safe flight and landing after a bird strike. The FAA also proposes a requirement for bird deterrence devices to reduce the potential for bird strikes. Research, testing, and use of bird deterrence technology have effectively reduced bird strikes. Alerting birds to the presence of the aircraft allows them to avoid striking the aircraft. Bird deterrence systems may include, for example, light technology to aid birds in detecting and preventing the aircraft (FAA, 2022a, 2022b).

Compared with the study conducted by Cardoso, de Oliveira and Godoy (2022), the FAA has harmonized the bird mass with the EASA requirement. However, still in a more generic way (the applicant must evaluate which areas are more exposed to bird strikes), and there are no requirements for multiple bird strikes. On the other hand, the FAA proposes a requirement for bird deterrence devices, which EASA does not require. Documents for EASA type certificate applicants for the VTOL aircraft, such as the ones published by the FAA for Joby Aero and Archer Aviation, were not found in this research.

5. CLOSING REMARKS

5.1 Limitations of the Present Work and Suggestions for Future Works

The present work focused on the different approaches the FAA and EASA took regarding the definition of the certification basis applicable to the new VTOL aircraft under development. A brief review of the current status of a few selected aeronautical authorities was also conducted, and a study case of the bird strike requirements was performed.

With only one specific case of requirements (related to bird strikes), significant differences were found between the certification requirements of both authorities.

Other systems requirements, such as propulsion, flight controls, energy storage systems, and crashworthiness devices, could also be evaluated.

It was also impossible to discuss this work's topics with certification authorities and engineering personnel from VTOL manufacturers, which could provide a rich perspective of this evolving scenario.

Another area for improvement is the brief review of the activities performed by other aeronautical certification authorities related to the VTOL aircraft. That review can be deepened and widened to more aeronautical certification authorities from different countries.

The presented limitations are suggested as future works as they will complement the initial findings of the present work.

5.2 Conclusions

Upon analyzing the path taken by both the FAA and EASA, it is evident that they adopted different approaches. The FAA ultimately chose to follow the certification path outlined in 14 CFR § 21.17(b), which requires the publication of a Special Class Airworthiness Criteria for each applicant that outlines the applicable regulations specific to their design. In contrast, EASA opted to publish a set of documents for VTOL Special Condition and Means of Compliance based on CS-23, incorporating revisions, additions, and integration of CS-27 as necessary. All applicants seeking VTOL aircraft certification under EASA rules will follow this set of documents.

While both authorities aim to maintain and increase the safety levels for VTOL aircraft design and operations, the differences in the bird strike case study show that the different requirements may lead to different design solutions with implications on the industry development and competitive landscape.

Considering that the industry is still in its early stages, it is expected that further changes occur in the applicable regulations with the future goal of harmonizing them among the certification authorities. Achieving this goal will ensure a leveled competitive field for all companies developing novel VTOL aircraft.

REFERENCES

ANAC (2023). *Advanced Air Mobility –*

Panorama e Perspectivas - 2023. Available at: https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-arquivos/aam-panorama-2023.pdf. Accessed: 30 August 2023.

Booz Allen Hamilton (2018). *Final Report: Urban Air Mobility (UAM) Market Study*. McLean: Booz Allen Hamilton. Available at: https://ntrs.nasa.gov/citations/20190001472. Accessed: 13 July 2023.

CAA (2020). *UK EU Transition*. Available at: https://www.caa.co.uk/our-work/about-us/uk-eu-transition/. Accessed: 30 August 2023.

CAA (2022). *UK determines certification standards for new electric vertical take-off and landing aircraft*. Available at: https://www.caa.co.uk/newsroom/news/uk-determines-certification-standards-for-new-electric-vertical-take-off-and-landing-aircraft/#. Accessed: 30 August 2023.

Cardoso, S.H.S.B., de Oliveira, M.V.R. and Godoy, J.R.S. (2022). *eVTOL Certification in FAA and EASA Performance-Based Regulation Environments: A Bird Strike Study-Case*. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 14. Available at: https://doi.org/10.1590/jatm.v14.1271. Accessed: 27 June 2023.

CASA (2023). *Advanced air mobility (AAM)*. Available at: https://www.casa.gov.au/resources-and-education/publications-and-resources/corporate-publications/emerging-technologies-program/advanced-air-mobility-aam#Immediateterm2023%E2%80%93mid2025. Accessed: 30 August 2023.

EASA (2017). *Explanatory Note to Decision 2017/013/R - Reorganisation of CS-23*. Available at: https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-23-amendment-5. Accessed: 3 July 2023.

EASA (2018). *Proposed Special Condition for Small-Category VTOL Aircraft*. Available at: https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/special-condition-vtol#group-easa-related-content. Accessed: 26 June 2023.

EASA (2019). *Special Condition for Small-Category VTOL Aircraft*. Available at: https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/special-condition-vtol. Accessed: 26 June 2023.

EASA (2021). *Final Special Condition SC E-19 - Electric / Hybrid Propulsion System - Issue 01*. Available at: https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/final-special-condition-sc-e-19-electric. Accessed: 26 June 2023.

EASA (2023). *Special Condition for VTOL and Means of Compliance*. Available at: https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/special-condition-vtol#group-easa-related-content. Accessed: 26 June 2023.

EHang (2023). *EHang Unmanned Aircraft Cloud System Approved by the CAAC; EH216-S Positioned for Post-TC Commercial Operations*. Available at: https://www.ehang.com/news/984.html. Accessed: 30 August 2023.

FAA (2022a). *Airworthiness Criteria: Special Class Airworthiness Criteria for the Archer Aviation Inc. Model M001 Powered-Lift*. Available at: https://www.federalregister.gov/documents/2022/12/20/2022-27445/airworthiness-criteria-special-class-airworthiness-criteria-for-the-archer-aviation-inc-model-m001. Accessed: 5 July 2023.

FAA (2022b). *Airworthiness Criteria: Special Class Airworthiness Criteria for the Joby Aero, Inc. Model JAS4-1 Powered-Lift*. Available at: https://www.federalregister.gov/documents/2022/11/08/2022-23962/airworthiness-criteria-special-class-airworthiness-criteria-for-the-joby-aero-inc-model-jas4-1#citation-4-p67402. Accessed: 5 July 2023.

FAA (2023). *Integration of Powered-Lift: Pilot Certification and Operations; Miscellaneous Amendments Related to*

Rotorcraft and Airplanes. [Preprint]. Available at: https://www.federalregister.gov/documents/2023/06/14/2023-11497/integration-of-powered-lift-pilot-certification-and-operations-miscellaneous-amendments-related-to#citation-1-p38947. Accessed: 28 June 2023.

Hirschberg, M. (2022). *FAA Changes Course on eVTOL Certification*. The Vertical Flight Society. Available at: https://vtol.org/news/commentary-faa-changes-course-on-evtol-certification. Accessed: 27 June 2023.

USA Department of Transportation (2023). *Regulatory Gaps and Lack of Consensus Hindered FAA's Progress in Certifying Advanced Air Mobility Aircraft, and Challenges Remain*. Available at: https://www.oig.dot.gov/library-item/39534. Accessed: 27 June 2023.

USA National Archives and Records Administration (2023). *Code of Federal Regulations - Title 14*. Available at: https://www.ecfr.gov/current/title-14. Accessed: 20 June 2023.

COMPARING THE PERFORMANCE OF DIFFERENT VERTIPORT TOPOLOGIES USING DISCRETE EVENT SIMULATION

Eva Feldhoff *[a], Giovanna Ronzani [b], Johannes Reichmuth [a]
[a] RWTH Aachen University, Institute of Transport Science
[b] Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

*** Corresponding author e-mail address**: feldhoff@via.rwth-aachen.de

PAPER ID: SIT2183

ABSTRACT

On the way to realizing urban air mobility, vertiports designed for efficient operations constitute an essential requirement. This study presents a simulation framework to provide insights into vertiport operations and capacity under different operating conditions and with different vertiport topologies. The model is developed as Discrete Event Simulation (DES) model using Anylogic. The study includes the assessment of throughput capacity and practical capacity of two vertiport topologies (satellite and pier topology). The topology with the higher throughput capacity depends on the number of stands of the vertiport. Moreover, operational parameters such as the number of pre-staged aircraft and turnaround time are found to influence which topology achieves higher throughput capacity. Practical capacity is evaluated for a full day of operation for various traffic flow levels and several randomized flight plans. Waiting time for landing is found to be significantly higher than waiting time for takeoff and determines the practical capacity of the vertiport.

Keywords: urban air mobility, discrete event simulation, vertiport operations, vertiport design.

1. INTRODUCTION

Urban Air Mobility (UAM) is expected to enable new possibilities for passenger and cargo transport and medical services in urban areas by using aircraft that are capable of electric Vertical TakeOff and Landing (eVTOLs). Current UAM research topics are manyfold and include vehicles, operations, and acceptance among others (Straubinger et al., 2020). One of the main hurdles for UAM, as identified by a survey conducted by the EASA (2021), is UAM infrastructure, which is commonly referred to as *vertiports*. However, a literature review conducted by Garrow et al. (2021) revealed that UAM infrastructure, i.e. vertiports, has been less researched compared to other UAM topics.

A vertiport is defined by the EASA (2022) as *"an area of land, water, or structure that is used or intended to be used for the landing, take-off, and movement of VTOL-capable aircraft"*. Some other terms such as *"vertihubs"*, *"vertistations"* and *"vertistops"* were also introduced in this context to refer to vertiports of a specific size or function (Lineberger et al., 2019; Schuchardt et al., 2021). The key infrastructural elements of a vertiport include Touchdown and Lift-Off areas (TLOFs) and aircraft stands. Stands are intended for loading and unloading of passengers and/or cargo, as well as the servicing of the aircraft. Some researchers also suggest the addition of *"staging stands"*, which are similar to aircraft stands but do not allow for passenger activities (Vascik & Hansman, 2019). The infrastructural elements are usually connected by designated taxiways. The number and layout of the infrastructural elements (also referred to as vertiport *topology*) is an essential factor for the performance and capacity of the vertiport. Therefore, it is crucial to understand the impact of different vertiport topologies on operations to ensure a satisfactory traffic flow.

This study presents a simulation framework to gain insights into vertiport airside capacity by comparing different vertiport topologies under different operational conditions. The vertiport operations are modelled for the different sets of topologies and conditions within a Discrete Event Simulation (DES) framework. The simulation framework enables to assess throughput capacity and practical capacity of the vertiports.

2. STATE-OF-THE-ART OF VERTIPORT OPERATIONS STUDIES

In recent years, first in-depth studies have been conducted on the operation and performance of the vertiport airside. All studies listed here were published since 2019, marking this topic as a very recent research field. Vascik & Hansman (2019) use an Integer Programming (IP) formulation to estimate the throughput capacity of vertiports and present resulting capacity envelopes. They identify four different types of topologies. These topologies are depicted in Figure 1 with four or more TLOFs each. Vascik & Hansman (2019) provide a comparison of the footprint of the topologies and qualitatively describe the advantages and disadvantages of the topologies in terms of their impact on operational robustness and efficiency.

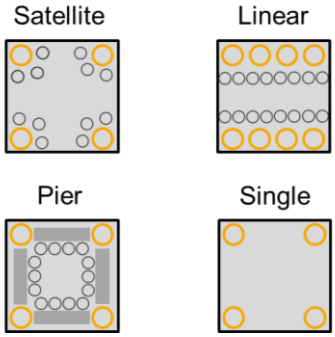


Figure 1 Vertiport Topologies. Based on (Vascik & Hansman, 2019).

Guerreiro et al. (2020) apply a simulation model to evaluate vertiport capacity using a "vertiport scheduler". The authors do not consider any specific topology and assume that each *"vertipad"* (i.e. TLOF) has access to any aircraft stand and vice versa. A generic taxi time is included in the *"surface time"* of every vehicle. Schweiger et al. (2021) present a Linear Independent Expandable Drive Through (LIEDT) layout. They conduct simulation studies using DES to investigate the airside traffic flow in terms of delay and punctuality. Zelinski (2020) presents three different vertiport topologies and evaluates their relative surface area utilization and throughput capacity, considering different wind conditions. Rimjha & Trani (2021) use a DES model to assess the capacity of vertiports of different sizes in the pier topology. The

evaluation also includes the output parameters infrastructure utilization and queue length. Preis & Hornung (2022) use agent-based simulation to assess the practical capacity of vertiports with satellite topology under various conditions.

From the literature review it becomes clear that different topologies have already been presented in research. While most studies focus on only one topology, there have been attempts to compare different topologies regarding their theoretical capacity. A comparison regarding practical capacity is lacking to date. This study aims to fill this gap.

3. METHODOLOGY

3.1. VERTIPORT DESIGN

The literature review revealed that four different topologies are currently researched. The *single* topology offers very little possibilities for adaptation and is only reasonable for small areas. It is thus not investigated in this study. The *linear* topology is most suitable for operations with short turnaround times, as this topology usually includes more TLOF pads than other topologies (Vascik & Hansman, 2019). Turnaround times for eVTOLs are expected to be higher than for helicopter operations, as travelers might be less experienced and electric energy supply potentially takes more time than fueling and needs to be performed more often. Thus, the linear topology is not considered in this study. The two remaining topologies identified in the literature review are the *satellite* and the *pier* topology. The comparison of these topologies in terms of capacity is a key element of this study.

The comparison is conducted for vertiports with 1-4 TLOFs and 1-10 stands per TLOF. The pier topology has a taxiway connecting one or two TLOFs with the stands, which are distributed parallel to the taxiway. This design is copied for vertiports with three or four TLOFs. It ensures that the approach and departure paths are kept free, and that landings and takeoffs can take place from as many directions as possible. The satellite topology is designed in such a way that one TLOF is surrounded by one or more stands at a circumference of 90°. This design again allows a wide range of approach and departure directions.

The dimensions of the infrastructure elements are chosen following the Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports published by the EASA (2022). The EASA specifies the dimension *D* as the diameter of the smallest circle enclosing the VTOL aircraft (simplified). This dimension is crucial for the size of most vertiport elements such as the TLOFs and stands. Considering the eVTOL concepts that are currently under development, the dimension D is assumed to be 12 m. This dimension considers vehicle concepts such as Joby S4, VoloCity and Aurora. An exemplary design of a pier topology is shown in Figure 2.

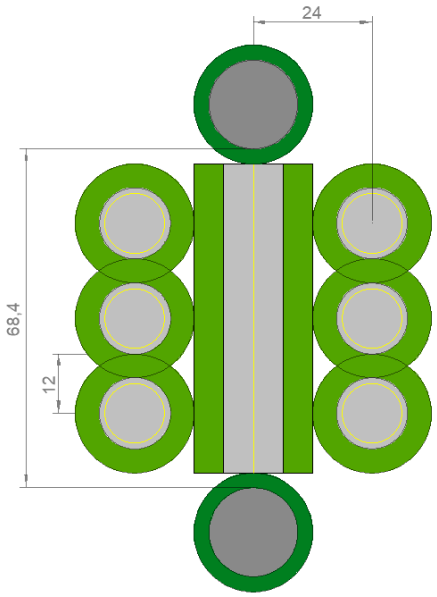


Figure 2 Exemplary Design of a Pier Topology with Two TLOFs and Six Stands.

3.2. MODEL DEVELOPMENT

The simulation framework is based on a Discrete Event Simulation (DES) model built with the software *Anylogic*. The conceptual model for this framework, as presented in Figure 3, is implemented in the DES model. The model boundary is formed by eVTOLs entering and leaving the airspace surrounding the TLOF. eVTOLs are delayed in a holding queue until the vertiport is available for the next arrival. Every eVTOL uses a TLOF “resource” until it has landed and cleared the TLOF. Next, the eVTOL taxis to the assigned stand where it performs the turnaround. Before the eVTOL is released to taxi to the TLOF and takeoff, it is delayed until the next TLOF is available for takeoff. The process flow ends with the eVTOL leaving the vertiport and vertiport airspace.

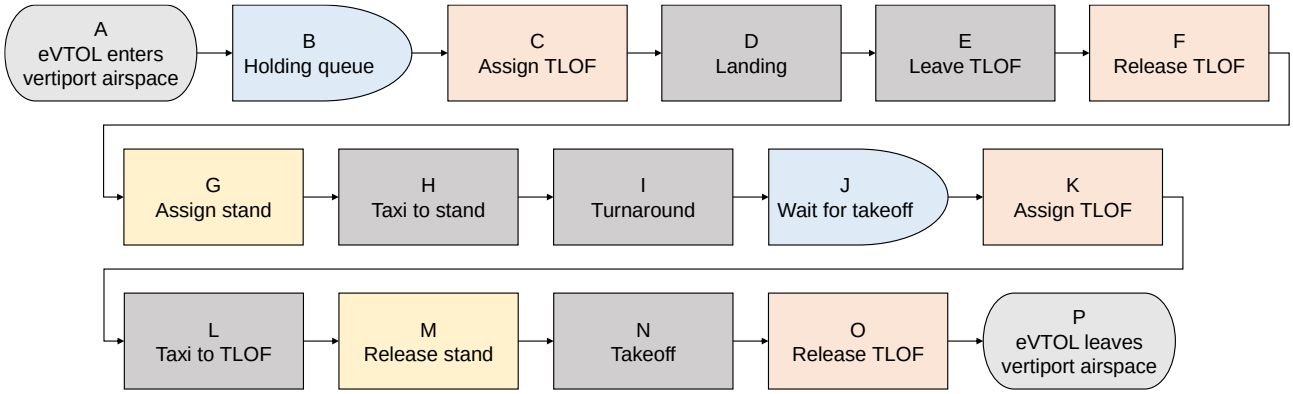


Figure 3 Conceptual Model.

For the considered vertiport operations, arrivals are prioritized to departures. However, no further arrivals are accepted if the number of eVTOLs at the vertiport has reached the number of stands. The taxi times depend on the individual distances between TLOFs and stands. These distances also depend on the number of stands at the vertiport (see Section 3.1) and are retrieved during the simulation from look-up tables for each vertiport size and topology considered. Another input parameter table defines the status of both TLOFs and stands (active or disabled), process times, and the presence of pre-staged aircraft for every scenario.

Model verification is performed using the following techniques: modular model development and successive debugging, conduction of a sensitivity study, and observation of visual animation. The validation of the model constitutes a major challenge because there is no data from real operations that could be used for validation. Therefore, the results from the DES model are compared to an analytical model, which was presented by Guerreiro et al. (2020). Due to the nature of the analytical model, the comparison must be made for the throughput capacity and under certain input parameters. The detailed presentation of the comparison between the analytical model and the DES model is beyond the scope of this study. The input parameters are further investigated in a sensitivity analysis.

3.3. SCENARIO DEFINITION

Defining scenarios for UAM simulations is challenging because no vertiports are in commercial operation today. Thus, no real data can be observed and used to define process times, arrival flows, etc. Instead, the baseline scenario of this study is based on a comprehensive literature review. The following tables present data used in the literature for departure and arrival times, turnaround time, and taxi speed, respectively. The parameters for the baseline scenario were defined in accordance with the mean values of the literature review. Thus, the arrival time, departure time, turnaround time, and taxi speed are set to *70 s*, *60 s*, *500 s*, and *2 m/s*, respectively.

Table 1 Summary of Departure and Arrival Times

Source	***Departure time***	***Arrival time***
Zhang et al., 2023	30 s	45 s
Guerreiro et al., 2020	60 s	60 s
Zelinski, 2020	60 s	60 s
Ahn & Hwang, 2022	60 s	60 s
Preis et al., 2021	60 s	60 s
Rimjha & Trani, 2021	60 s	90 s
Schweiger et al., 2022	66 s	75 s
Park & Kim, 2022	90 s	90 s
Kleinbekman et al., 2018	-	90 s

Table 2 Summary of Turnaround Times

Source	***Value***
Ahn & Hwang, 2022	300 s
Zelinski, 2020	480 s
Schweiger et al., 2022	600 s
Park & Kim, 2022	600 s

Table 3 Summary of Taxi Speeds

Source	*Value*
Zelinski, 2020	1.22 m/s
Uber, 2019	1.34 m/s
Preis et al., 2021	2.2 m/s
Schweiger et al., 2022	2.6 m/s

3.4. CAPACITY ASSESSMENT

In the first step, the throughput capacity is determined by inserting an infinite number of eVTOLs at the source of the model flowchart (i.e. available for landing). The throughput capacity is observed for one hour of simulation. In the baseline scenario, the vertiport is assumed to be empty at the start of the simulation (no pre-staged aircraft). The throughput capacity is then expanded by a sensitivity study, which includes a variation of every input parameter of the baseline scenario as summarized in Table 4.

Table 4 Parameter Variation of the Sensitivity Study

Parameter	*Design points*	*Unit*
Departure time	45, **60**, 75, 90	s
Arrival time	55, **70**, 85, 100	s
Turnaround time	250, **500**, 1000	s
Taxi speed	1, **2**, 3	m/s
Pre-staged aircraft	**none**, half, all	-

As stated by de Neufville & Odoni (2013), an infinite delay is accepted when determining the throughput capacity (or theoretical capacity) of an airport system. Opposed to the throughput capacity, the practical capacity relates the traffic flow to the experienced delay. To evaluate the practical capacity of a vertiport, an acceptable delay level needs to be defined, which should not be overstepped during the operations. For this study, the acceptable delay level is set to 4 minutes, according to Preis & Hornung (2022).

To assess the practical capacity of the vertiport, a full day of operations is simulated. Operations are assumed from 6:00 to 22:00. Arrival times of eVTOLs are defined by creating random sampled flight plans. Departures are not scheduled prior to simulating as they are assumed to proceed as soon as possible after the arrival of an aircraft (i.e. after the required turnaround time). This strategy follows current flight planning strategies for commercial short-haul flights. The arrival flight plans are created based on the daily traffic graph as assessed in the major German mobility survey and elaborated by Klein (2021). The daily traffic graph is presented in Figure 4.

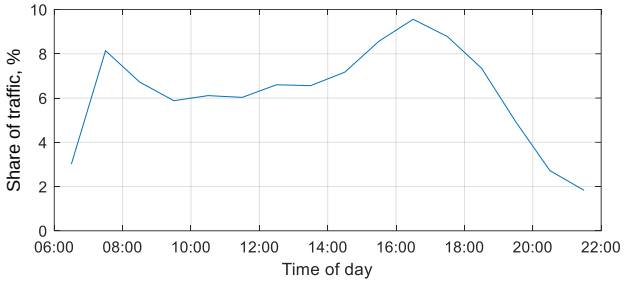


Figure 4 Daily Traffic Graph in Germany. Based on (Klein, 2021).

The flight plans are created for different numbers of arrivals per peak hour (16:00h to 17:00h). Based on the share of traffic per hour, the number of arrivals in all other hours of operation are calculated from the number of arrivals per peak hour. In the next step, the arrivals are randomly distributed (following a uniform distribution) for each hour of operation. The scheduled times are rounded to the nearest minute (e.g., no departure at 08:45:20). For every number of peak hour arrivals, five flight plan samples are created.

4. RESULTS

4.1. THROUGHPUT CAPACITY

Figure 5 presents the throughput capacity for the baseline scenario under various vertiport sizes. The figure shows that throughput capacity increases with the number of TLOFs. However, for a very low number of stands (up to four), the capacity is independent from the number of TLOFs and increases further with the addition of another stand. For these operational conditions, the vertiport is limited by the "*surface capacity*", as introduced by Guerreiro et al. (2020). Once a certain number of stands are added to the vertiport, the throughput capacity does not increase any further. At this point, the vertiport is limited by the TLOF capacity. For the presented scenario, this "sweet spot" is present at a number of four stands per TLOF. The satellite topology achieves the highest throughput capacity at this point. This observation can be explained by looking at the design of a satellite topology:

Adding more stands to the circumference requires longer taxi distances as the protection areas have to remain clear. For the pier topology, there is no significant increase in throughput capacity when more than four stands are added to the vertiport. As the vertiport is limited by TLOF capacity at this stage, there is some spare surface capacity. Thus, further stands being added to the vertiport remain unused.

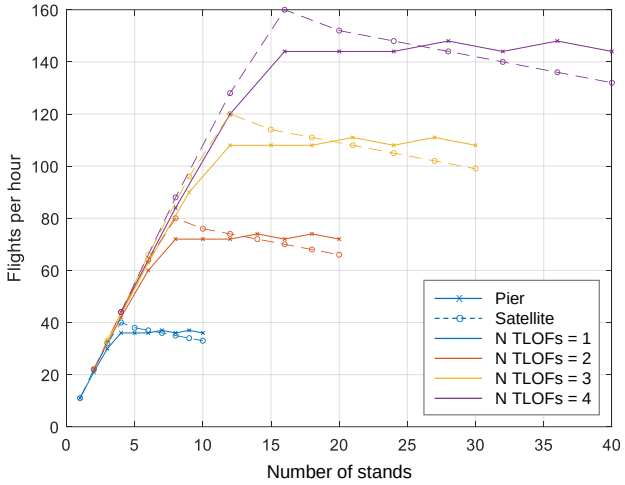


Figure 5 Throughput Capacity for the Baseline Scenario.

From Figure 5 it becomes obvious that the topology with the higher throughput capacity switches from one topology to the other one, once a certain number of stands is added: for six or less stands per TLOF, the satellite topology shows a higher throughput capacity than the pier topology. For seven or more stands per TLOF, the pier topology performs better. The shorter average taxi distance indicates the topology with the higher throughput capacity.

These findings can be verified by analyzing the utilization rates of the TLOFs as shown in Figure 6. The TLOF utilization for four stands per TLOF is higher for the satellite topology than for the pier topology. Overall, the utilization rates increase significantly as more stands are added until the number of four stands is reached. Adding further stands only results in either very small increases or even decreases in TLOF utilization.

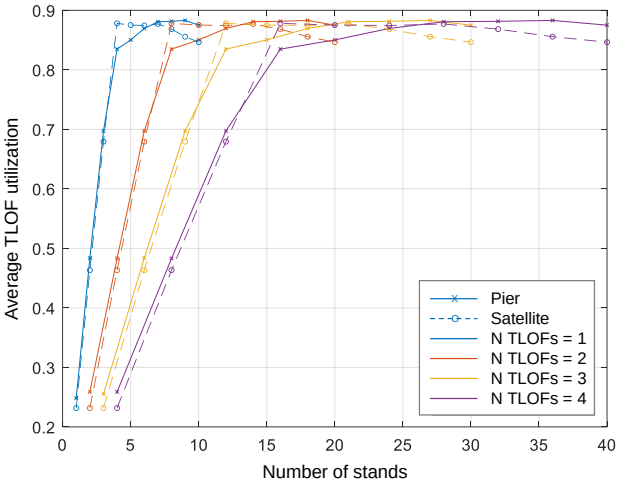


Figure 6 TLOF Utilization Rates for the Baseline Scenario.

As explained in Section 3.4, the throughput capacity assessment includes a sensitivity study. The following results were produced for vertiports with two TLOFs of the two different topologies satellite and pier. Figure 7 presents the effect of the arrival and departure time, the turnaround time, the taxi speed, and the number of pre-staged aircraft. The arrival and departure time do not impact the topology with the higher throughput capacity; the higher-capacity topology only depends on the number of stands. However, the difference between the two throughput capacities increases as the arrival and departure times decrease. From Figure 7 it becomes clear that the difference between the throughput capacities of the two topologies becomes smaller as the turnaround time increases. The number of stands that triggers a change of the higher-capacity topology is minimally influenced by the turnaround time.

The difference between the throughput capacities of the two topologies is smaller for higher taxi speeds and sometimes influences which topology reaches the higher throughput capacity. The number of pre-staged aircraft influences which topology has the higher throughput capacity. For example, for a vertiport with 16 stands, the pier topology achieves a higher throughput capacity than the satellite topology if there are no pre-staged aircraft at the start of operations. The opposite is true if all stands are occupied by pre-staged aircraft.

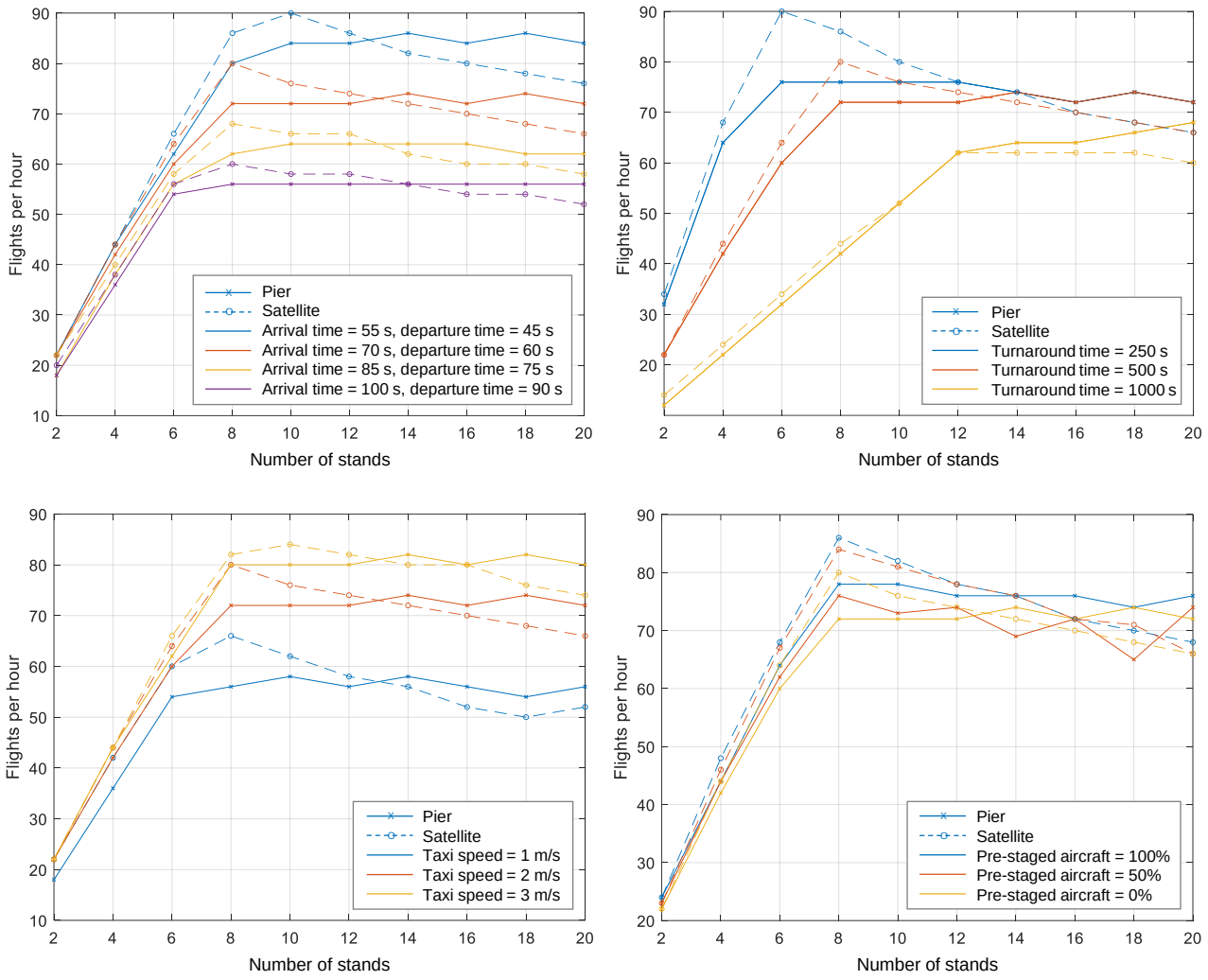


Figure 7 Throughput Capacity under Variation of (i) Arrival and Departure Time, (ii) Turnaround Time, (iii) Taxi Speed, (iv) Number of Pre-Staged Aircraft.

4.2. PRACTICAL CAPACITY

The practical capacity was assessed for a vertiport with two TLOFs and the two different topologies. As explained in Section 3.4, the practical capacity is defined as the traffic flow that can be handled under a given acceptable level of delay, i.e. waiting time.

The created model framework enables to observe the waiting times of each individual flight. Figure 8 shows the individual waiting times during one day of operation for five flight plan samples with equal flight volume per hour. (The example is presented for 20 arrivals per peak hour and 157 daily arrivals, with equal number of departures). In this example, the vertiport consists of two TLOFs and six stands.

The practical capacity is retrieved from the average waiting time per scenario. Figure 9 shows the daily average waiting time for the baseline scenario with two TLOFs and 6 stands. The colored points show the result of each flight plan sample, while the black points connected by a graph show the average of all flight plan samples at a certain traffic flow design point. The results indicate that waiting times increase exponentially with increasing traffic flow. In this example, the practical capacity for the delay level of four minutes corresponds to 33 and 36 arrivals (and the same number of departures) for the pier and satellite topology, respectively. The practical capacity of the pier topology being smaller than that of the satellite topology corresponds to the results from the throughput capacity.

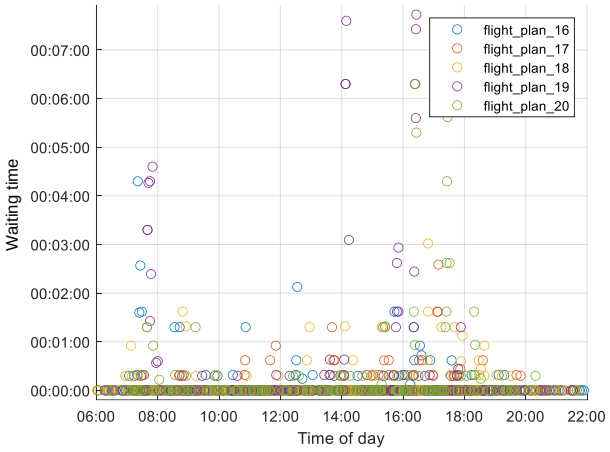


Figure 8 Individual Waiting Times for Landing for Different Flight Plans.

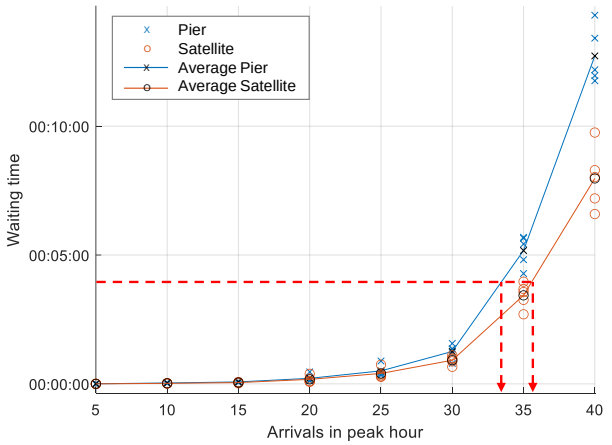


Figure 9 Average Waiting Time and Practical Capacity for Landing.

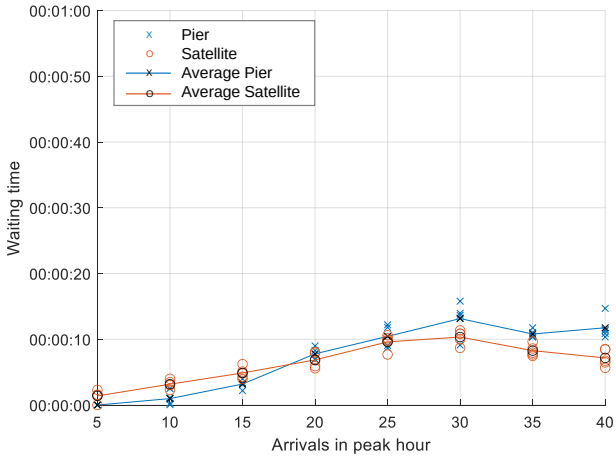


Figure 10 Average Waiting Time for Takeoff.

For the same scenario, waiting times for takeoff are plotted in Figure 10. It becomes obvious that the waiting times are significantly lower for takeoff than for landing. This finding is very interesting since arrivals are prioritized over departures, but still face longer waiting times. In general, regardless of whether the waiting time for landing or takeoff is higher, the waiting time for landing should represent the critical indictor for practical capacity: Energy reserves during flight are expected to be limited for eVTOLs while, on the contrary, waiting for takeoff does not affect the energy state.

5. CONCLUSION

This study presents a DES framework to analyse vertiport operations under different operational scenarios. Two vertiport topologies, the pier and the satellite topology, are simulated in this study. The designs follow the regulations published by EASA (2022). The baseline scenario of operational parameters is based on a literature review on vertiport operations. Throughput capacity is assessed including parameter variation. The topology with the higher throughput capacity depends on the number of stands at the vertiport. Operational parameters such as the number of pre-staged aircraft and turnaround time are also found to influence which topology achieves higher throughput capacity. The practical capacity is assessed for a full day of operation for different traffic flow levels and several randomized flight plans. Waiting time for landing is significantly higher than waiting time for takeoff and determines the practical capacity, which is defined as the maximum traffic flow with average waiting time below four minutes.

The simulation framework can be used for any specific set of input parameters, which may be determined by environmental factors such as the intended eVTOL concepts, the size of a vertiport, or separation requirements. The simulation framework enables to assess both throughput capacity and practical capacity by tracking the number of operations, utilization rates of the infrastructure elements, and waiting times of each individual flight. The provided insights on how to design a vertiport for efficient operations are relevant to vertiport developers, air traffic control and vehicle manufacturers.

Future work will focus on expanding the sensitivity analysis by applying Factorial Experimental Design. Regarding practical capacity, the acceptable delay level of four minutes may need to be adjusted as acceptable delay is determined by the available energy

reserves of an eVTOL prior to landing. This value needs to be verified as the maturity of vehicle and network concepts increases and might be subject to adaptation. Moreover, the design regulations applied for this study are expected to be adapted in the future. Thus, different design scenarios need to be investigated within the model. In the next step, the presented simulation framework shall be expanded by the vertiport airspace to enable simulation of arrival and departure routes and the effect of separation requirements.

6. REFERENCES

Ahn, B. & Hwang, H.-Y. (2022). Design Criteria and Accommodating Capacity Analysis of Vertiports for Urban Air Mobility and Its Application at Gimpo Airport in Korea. *Applied Sciences, 12, 6077.* doi: 10.3390/app12126077

European Union Aviation Safety Agency (EASA) (2021). Study on the societal acceptance of Urban Air Mobility in Europe.

European Union Aviation Safety Agency (EASA) (2022). Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN).

Garrow, L. A., German, B. J., Leonard, C. E. (2021). Urban air mobility: A comprehensive review and comparative analysis with autonomous and electric ground transportation for informing future research. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 132,* 103377. doi: 10.1016/j.trc.2021.103377

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. Virtual event. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.*

Klein, T. (2021). Neue Tagesganglinien des Quell- und Zielverkehrs – Auswertung der MiD-Daten zum nutzungsspezifischen Tagesgang der Verkehrsnachfrage. *Straßenverkehrstechnik, 3, pp. 183-189.*

Kleinbekman, I., Mitici, M., Wei, P. (2018). eVTOL Arrival Sequencing and Scheduling for On-Demand Urban Air Mobility. *37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). 9/23/2018 - 9/27/2018: IEEE*. doi: 10.1109/DASC.2018.8569645

Lineberger, R.; Hussain, A.; Metcalfe, M.; Rutgers, V. (2019). Infrastructure barriers to the elevated future of mobility. Deloitte Insights. URL: https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html.

Neufville, R. de & Odoni, A. R. (2013). *Airport Systems: Planning, Design, and Management,* (2 ed.). New York, London: McGraw-Hill Education.

Park, B. & Kim, S. (2022). Vertiport Design Optimization using Integer Programming. *41st Digital Avionics Systems Conference (DASC). Portsmouth, VA, USA, 9/18/2022 – 9/22/2022: IEEE, pp. 1–6.* doi: 10.1109/DASC55683.2022.9925809

Preis, L., Amirzada, A.; Hornung, M. (2021). Ground Operation on Vertiports – Introduction of an Agent-Based Simulation Framework. *AIAA Scitech 2021 Forum. Virtual Event. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.* doi: 10.2514/6.2021-1898

Preis, L. & Hornung, M. (2022). A Vertiport Design Heuristic to Ensure Efficient Ground Operations for Urban Air Mobility. *Applied Sciences 12 (14), 7260.* doi: 10.3390/app12147260

Rimjha, M. & Trani, A. (2021). Urban Air Mobility: Factors Affecting Vertiport Capacity. *2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS). Dulles, VA, USA, 4/19/2021 - 4/23/2021: IEEE.* doi: 10.1109/ICNS52807.2021.9441631

Schuchardt, B.; Becker, D.; Becker, R.-G., End, A., Gerz, T., Meller, F. et al. (2021). Urban Air Mobility Research at the DLR German Aerospace Center – Getting the HorizonUAM Project Started. *AIAA Aviation 2021 Forum. Virtual Event. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.*

Schweiger, K., Knabe, F., Korn, B. (2021). Urban Air Mobility: Vertidrome

Airside Level of Service Concept. *AIAA Aviation 2021 Forum. Virtual event. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.* doi: 10.2514/6.2021-3201

Schweiger, K.; Knabe, F.; Korn, B. (2022). An exemplary definition of a vertidrome's airside concept of operations. *Aerospace Science and Technology, 125, 107144*. doi: 10.1016/j.ast.2021.107144

Straubinger, A., Rothfeld, R., Shamiyeh, M.; Büchter, K.-D.; Kaiser, J.; Plötner, K. (2020). An overview of current research and developments in urban air mobility – Setting the scene for UAM introduction. *Journal of Air Transport Management, 87, 101852*. doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101852

Uber (2019). UberAir Vehicle Requirements and Missions.

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 Forum. San Diego, California. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.* doi: 10.2514/6.2019-0526

Zelinski, S. (2020). Operational Analysis of Vertiport Surface Topology. *AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Antonio, TX, USA, 11.10.2020 - 15.10.2020: IEEE.* doi: 10.1109/DASC50938.2020.9256794

Zhang, H., Fei, Y., Jingyu, L., Liu, H. (2023). Method of Vertiport Capacity Assessment Based on Queuing Theory of Unmanned Aerial Vehicles. *Sustainability, 15, 709.*

HELIPAD CONNECTIVITY FOR ADVANCED AIR MOBILITY ON BIG CITIES IN THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

Peter Targino Klein*
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Mauro Caetano de Souza
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

*** Corresponding author e-mail address**: peter.klein@ga.ita.br

PAPER ID: SIT2159

ABSTRACT

This study addresses the improvement of the helipads and airports of four urban centers to accommodate Vertiports for Advanced Air Mobility, which promises to mitigate the problems caused by accessibility hardships in the urban environment. Seeing as few studies embody the social aspect so profoundly in contrast to the technical aspect of the aircraft themselves, the helipads were mapped all around the state of São Paulo and the point distribution was submitted to K-means clustering to find the areas within the urban centers with more growth capacity and public utility. The main findings of this study reveal that specific goals of accessibility can be achieved with little action, but the overall gains in welfare are small without specific investments in new infrastructure.

Keywords: Aerodromes, Aeronautics infrastructure, Regional integration, Spatial occupation.

ACKNOWLEDGEMENTS

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Mestrado em Computação Quântica, Fotônica Integrada e Inteligência Artificial, Processo 405489/2022-6, e Produtividade em Pesquisa – PQ, Processo 304919/2022-5).

2. INTRODUCTION

As the up-to-date sustainability goals break down in four fronts: Environmental, Energetic, Economic and Social Equity; there has been a great tendency for big cities, still usually seen as car-philic and pedestrian-phobic, to shift towards the paradigm of Sustainable Mobility - urging city planners to innovate in urban mobility policies and bring more infrastructure to peripheral areas to improve their integration to the more economically prosperous city centers.

This study aims to analyze the possible ways the Local Aerial Networks (LANs) can be shaped with their Vertiport distribution in order to allow Advanced Air Mobility (AAM) to prosper in its role as an everyday means of transportation inside big cities. To achieve this, the following objectives were set:

- Propose configurations for the LANs in four urban centers in the state of São Paulo based on a set of criteria;
- Estimate how much more areas can be achieved in 15 minutes or under by including air transportation as an option alongside the other modals for each of the proposed LAN configurations;
- Evaluate and make judgment on whether it is more advantageous for overall accessibility to design LANs with a few robust Vertiports or to do so with smaller and more spreaded out ones.

3. LITERATURE REVIEW

Studies such as the one performed by Staricco (2022) lead to the belief that biggest challenges for municipal administrators will be about transportation and housing issues aligning with the goal of achieving 15-minute cities, where the inhabitants would be able to reach any kind of essential service establishments within a time window of 15 minutes after leaving their homes. However, the policies worldwide for zoning and land usage in most locations are still outrageously impeditive for this concept of accessibility, and make it so that concepts such as “smart cities”, “sustainable cities” and “15-min cities” end up becoming just a political slogan for public administrators, as the urban growth outpaces the supply of basic infrastructure in a vicious cycle phenomenon.

AAM powered by renewable energy and intelligent usage of resources in new city planning techniques is the key to boost the required innovation on urban mobility to achieve sustainability on the social and energetic aspects without sacrificing the environmental and the economic ones. Happ et al. (2017) proposes a shared economy of sensors for reducing operational costs and negative environmental impacts in the scope of Internet of Things (IoT), which could be applied to air traffic control of drones in passenger/cargo transportation - but such implementation would, of course, not be possible without a central entity with access to data from any aircraft utilizing the system, highlighting the first hardship of optimal resource utilization: right to secrecy and protectionism of private information/property.

As noted in Bachofner et al. (2022), operations in urban environments are currently very inefficient in the context of last-mile logistics, from both an economic and environmental perspective, making it a necessity to attain more sustainability in city logistics operations in general and in the passenger mobility industry in particular, to which AAM shines as an alternative in the pursuit of this goal, as long as the stakeholders collaborate with one another. Raj & Sah (2019) make the same case regarding stakeholder collaboration in air transportation, emphasizing the role of the government in the form of regulatory agencies as key players in ensuring the trust and safety of the public.

The Brazilian *National Agency for Civil Aviation* (ANAC) is still figuring out how to deal with the imminent debut of widespread usage of electrical Vertical Take-off and Landing (eVTOL) aircraft for Urban Mobility, but perhaps the platform proposed by Happ et al. (2017) becomes a good guide for it, with the agency itself centralizing the flight data and forcing the stakeholder collaboration for AAM operations. The intern reorganization of the agency and the capability to maintain its newfounded data centers for AAM could be a deterrent in the sense of becoming another choking point in which the refusal to invest in long term system optimality would turn out to further bring Social Exclusion instead of Social Equity, as the air traffic management capacity wouldn’t grow at the same rate of the demand for air transportation.

Rajendran & Srinivas (2020) show the same concern regarding sustainability, calling out the energy, health and time losses in ground transportation modes as evidence for the need of exploration of faster alternatives for passengers in their everyday commute within urban areas, claiming that road congestion could be alleviated, Pukhova et al. (2021), however, concluded that the time savings obtained with intraurban air mobility are negligible in the case of operations involving flying taxis being chosen over conventional ground transportation, including both traditional helicopters and newer eVTOL aircraft - making the case for air mobility as a viable option for rural areas instead, such as mountainous regions that would require roads to stretch for longer distances in order to traverse around the disfavorable topography or to pass by the natural obstacles through the construction of expensive tunnels or bridges, whose maintenance can usually be very costly as well.

4. METHODOLOGY

In order to achieve the general objectives exposed, the following specific objectives are to be pursued in order for each of the four urban centers chosen:

- Every helipad in the state of São Paulo is mapped based on registration in ANAC;
- The helipads are grouped in clusters according to location and relative distance to the other nearest clusters;
- The major, hub-like Vertiports of the urban centers are allocated on already existing airports;
- A skeleton for the different LANs is then molded by pinpointing approximate locations for the Vertiports that will compose them in different restrictive conditions;
- To finally achieve an unique LAN, it is analyzed which helipads would offer a greater public utility as Vertiports and are close to the approximate pinpointed locations of the skeleton;
- Vertiports now compose a unique LAN by having their approximate locations in the LAN skeleton being updated into the chosen helipads precise locations;
- Travel times are measured and compared to essential service-providers utilizing intraurban air transportation versus not using it;
- The proportion of the population that can be well served in the LANs gets estimated;

In order to better conduct the present study, a few technical points are to not be addressed, as they could bring too much complexity for the early stage evaluations intended. That being said, the four assumptions made in order to simplify the analysis henceforth made are:

1. A clear definition of the necessary components each infrastructure would require in the initial phase of upgrades into Vertiports is already known and immediately applicable;
2. Any airport can begin operating as a hub-like Vertiport, with no loss in operation efficiency for the air operations they already host before the usage of eVTOL aircraft;
3. Every no-flight zone has been identified and any pair of Origin-Destination (OD) points on the same LAN have a possible and well-defined aerial route connecting them, whether it is a direct route or not;
4. Great São Paulo is the only of the four LANs where it is considered viable to have some new infrastructure developed specifically as a Vertiport for AAM, considering how much of a disparity it has in comparison to everywhere else regarding air transportation.

In terms of AAM infrastructure, existing helipads can be upgraded into Vertiports to serve as connectivity points for aerial networks, as it has been proposed in a number of studies such as the one performed by Ribeiro et al. (2023), which considers the Congonhas Airport, inside São Paulo Capital City, as a hub of operations for intraurban air transportation. The general idea of these studies is that such undertaking would facilitate the use of eVTOL vehicles for public air transportation, as it would better connect the already existing infrastructure and reduce the high initial costs that could prompt hesitation in early investments.

Taking that into account, alongside the remarks and conclusions made by Pukhova et al. (2021) and Rajendran & Srinivas (2020), it is

possible to better integrate the central areas in major urban centers in the state São Paulo to their peripheral areas, as it is to use the same modal to the mountainous rural areas near said urban centers.

The data for the usage of other Public Transportation Methods were also gathered in the corresponding municipal administrations' websites and the São Paulo state's *Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo* (EMTU) for estimation of demand in said cities and expansion plannings to their neighbor towns, leading to a few cities being chosen to be centers of innovation for eVTOL-based Public Air Transportation.

The 585 helipads registered in the state of São Paulo were divided in 32 clusters based on the K-means clustering algorithms described in Ikotun et al. (2023). Table 1 is shown following-up relevant data for the four major urban centers considered, centered around the cities of Campinas, São José dos Campos, São Paulo Capital City and Sorocaba.

Although the same kind of analysis and propositions can be made for other urban centers in the state of São Paulo, such as in the Santos Bay Area or in the Northern Litoral, these locations are of interest much more in the sense of a dedicated interurban air transportation study, as they are dense touristic destinations that would clearly very much benefit from innovations regarding accessibility from other urban centers towards them, but not as much in the context of intraurban air transportation from an end of the city to the other, as essential services are more spread out over them.

Table 1. Data on major cities in the state of São Paulo, Brazil and their great areas.

(Great) City	*Population*	*GDP (times R$ 1000)*	*Number of Helipads*
Campinas	1,138,309	61,397,263	24
Great Campinas	3,791,440	267,795,559	59
São José dos Campos	697,428	39,697,501	8
Great São José dos Campos	1,717,563	86,570,552	33
São Paulo	11,451,245	714,683,362	194
Great São Paulo	20,693,254	1,179,418,193	295
Sorocaba	723,574	35,015,188	7
Great Sorocaba	1,786,332	77,402,548	39
4 Great Urban Areas combined	27,988,589	1,611,186,852	426

5. RESULTS

The helipad distribution in the region of interest can be seen in Figure 1 below, where 20 of the initial 32 clusters were differentiated by color of points in the map, followed by Table 2, which regards data on the 13 clusters closer to the Congonhas Airport by the K-means division:

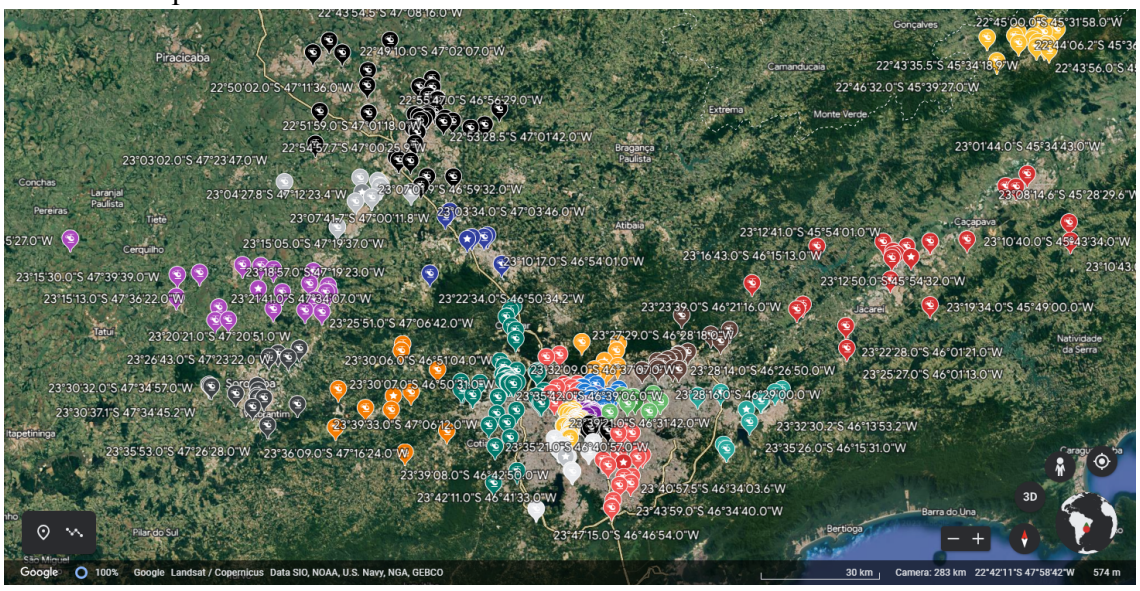


Figure 1 Distribution of helipads where point colors differentiate neighboring clusters filtered to the region of interest. Source: Own Research.

Table 2. Location and size of 13 clusters closer to Congonhas Airport seen in Figure 1 .

Cluster ID	*Central Coordinates*	*Avrg. distance point-center*	*Number of Helipads*
5	23°33'45.9"S 46°15'59.2"W	8.0 km	9
6	23°26'17.9"S 46°25'58.3"W	6.1 km	15
13	23°30'13.7"S 46°51'04.3"W	5.5 km	54
14	23°10'48.4"S 46°57'00.0"W	7.2 km	7
19	23°40'57.5"S 46°34'03.6"W	6.0 km	16
24	23°35'43.6"S 46°41'27.6"W	1.7 km	94
25	23°31'41.4"S 46°38'02.1"W	3.2 km	21
26	23°33'46.5"S 46°39'15.5"W	0.8 km	34
27	23°32'41.9"S 46°32'21.0"W	3.9 km	8
28	23°30'22.1"S 46°42'50.0"W	3.8 km	11
29	23°27'12.9"S 46°36'53.1"W	4.0 km	8
30	23°40'10.2"S 46°42'33.4"W	3.9 km	12
31	23°36'05.0"S 46°38'22.8"W	1.9 km	6

The short average distance of the points to their respective cluster centers, alongside the high amount of clusters close together make it noticeable how dense the Great São Paulo urban center is in terms of air transportation infrastructure in the form of helipads, especially when compared to the more spreaded out clusters around the other urban centers analyzed, as can be seen ahead in Table 3, but also calls attention to the Social Exclusion aspect of the air transportation frame when the two most eye-catching clusters are so close to each other and in an area between two airports, those being cluster 24 (centered near *Instituto Butantã*) with the highest amount of helipads and cluster 26 (centered in *Avenida Paulista*) with the shortest average distance to the cluster central point.

Table 3. Location and size of the 7 remaining clusters seen in Figure 1 .

Cluster ID	*Central Coordinates*	*Avrg. distance point-center*	*Number of Helipads*
4	23°13'05.3"S 45°51'48.9"W	20.3 km	21
7	22°53'58.3"S 47°04'38.8"W	10.0 km	40
11	23°31'56.0"S 47°07'52.2"W	11.4 km	10
12	23°30'31.6"S 47°27'59.3"W	8.0 km	15
15	23°17'26.5"S 47°27'43.5"W	14.8 km	20
16	23°04'27.8"S 47°12'23.4"W	7.4 km	9
23	22°43'35.5"S 45°34'18.9"W	4.6 km	16

Hence, in the Great São Paulo, the Congonhas Airport and Campo de Marte Airport can begin as the spine that will be shaping the skeleton of the Great São Paulo LAN centered around the most intense areas near clusters 24 and 26, as Figure 2 below shows. The Figure 3 that follows it contains the skeleton that comes after the air connecting attempt that immediately succeeds.

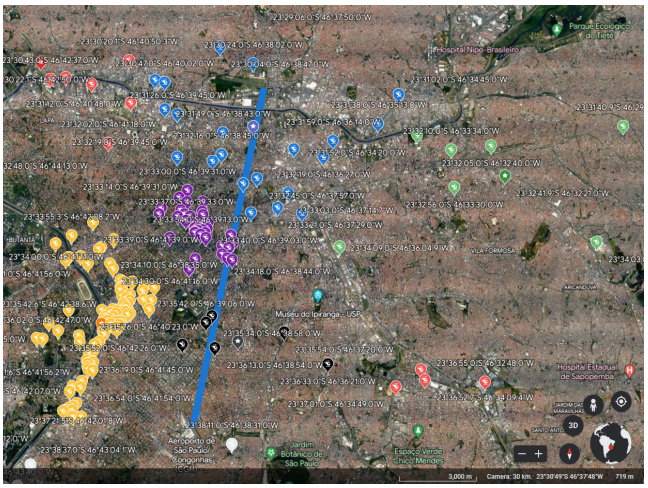


Figure 2 The line that connects Congonhas Airport and Campo de Marte Airport is traced and can act as the spine of the skeleton of Great São Paulo LAN. Source: Own Research.

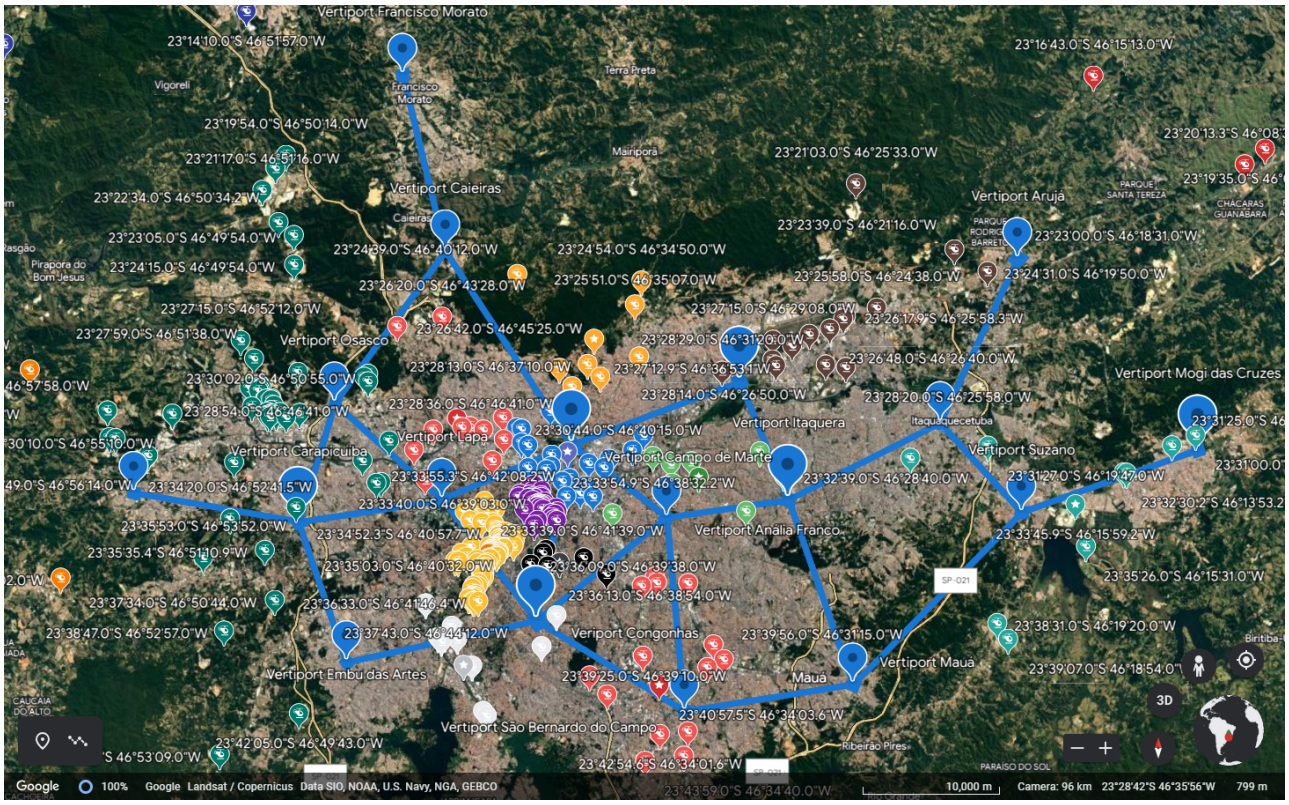


Figure 3 Skeleton of the Great São Paulo LAN in dark blue overlaid with the helipad locations. Source: Own Research.

Similarly, Great Sorocaba can have its LANs' skeleton molded taking the Sorocaba Airport as a debuting point, resulting in the skeleton shown in Figure 4 below:

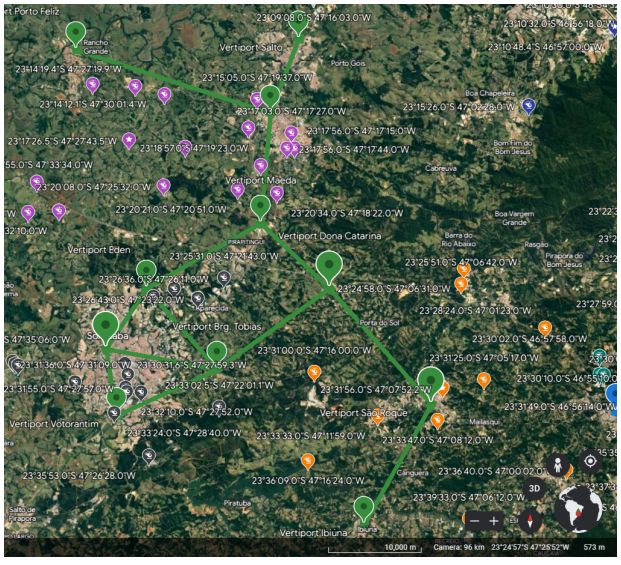


Figure 4 Skeleton of the Great Sorocaba LAN in green overlaid with the helipad locations. Source: Own Research.

When in comes to the Great Campinas, although official political divisions make them separate, its peripheral towns begin to mix much more with the neighboring regions and make it sort of a gray area whether the intraurban integration should extend towards locations such as Indaiatuba and Jundiaí or leave them to Great Sorocaba and Great São Paulo respectively. In order to assert Campinas as a regional force, both towns were included in Great Campinas LAN skeleton, as shown in Figure 5 below:

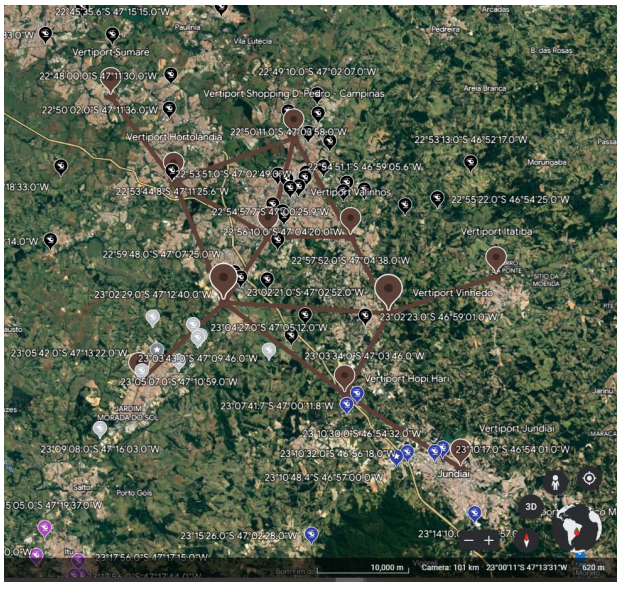


Figure 5 Skeleton of the Great Campinas LAN in brown overlaid with the helipad locations. Source: Own Research.

The Great São José dos Campos region is a very distinct case from the other 3 urban centers since it is located along a valley and, as

expected, the urban growth followed the low altitudes, while a few locations on the mountainous hills got to become big as touristic destinations.

That makes it so the LAN skeleton becomes very linear - not only that, but it goes along very closely to the biggest highway in the valley, the SP-060 Highway - towards Campos do Jordão and its 16 helipads with only a small detour, as shown in the Figure 6 ahead.

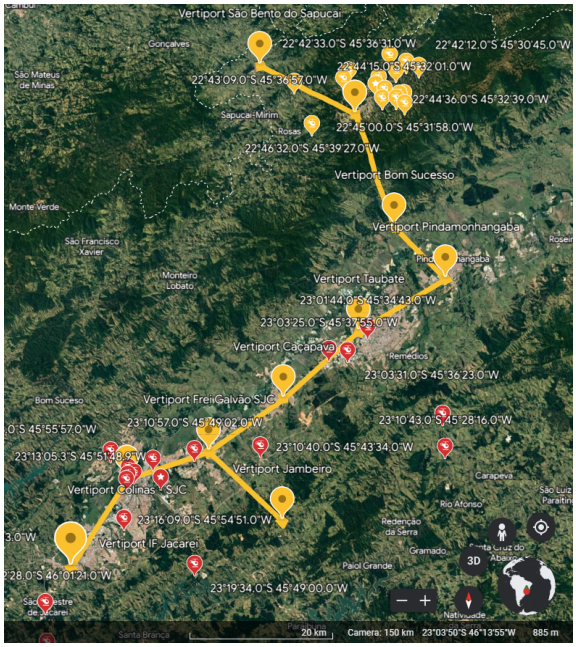


Figure 6 Skeleton of the Great São José dos Campos LAN in yellow overlaid with the helipad locations. Source: Own Research.

With the 4 skeletons of the LANs defined, the possibilities are tested and the notorious ones are proposed as shown in Figures 7 through 10, where each urban center is shown with the skeleton being overlaid by the actual locations of the already existing helipads that are proposed to be upgraded into Vertiports:

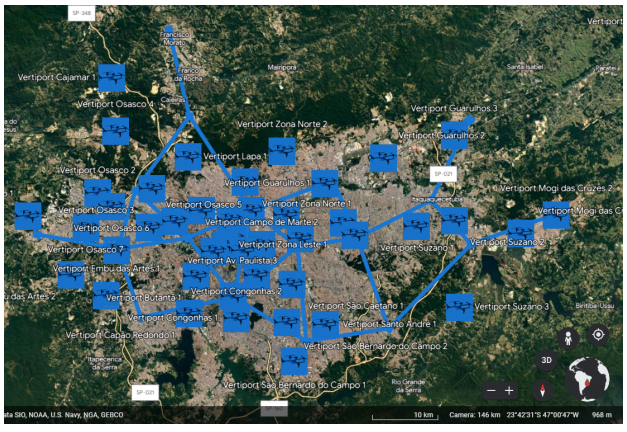


Figure 7 Vertiport locations for the LAN of Great São Paulo using the already present helipads and airports.

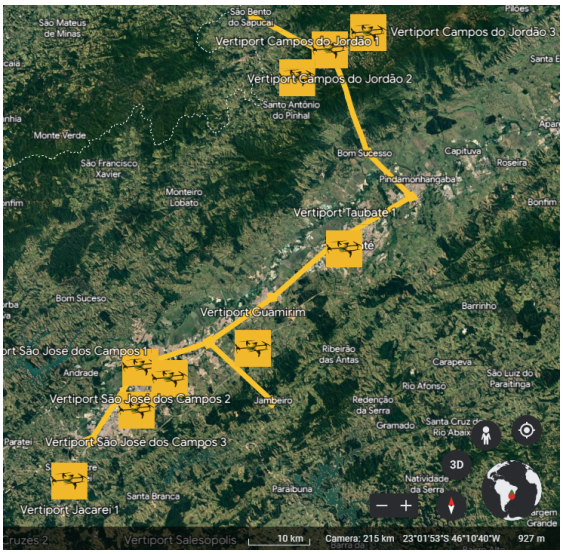


Figure 8 Vertiport locations for the LAN of Great São José dos Campos using the already present helipads and airports.

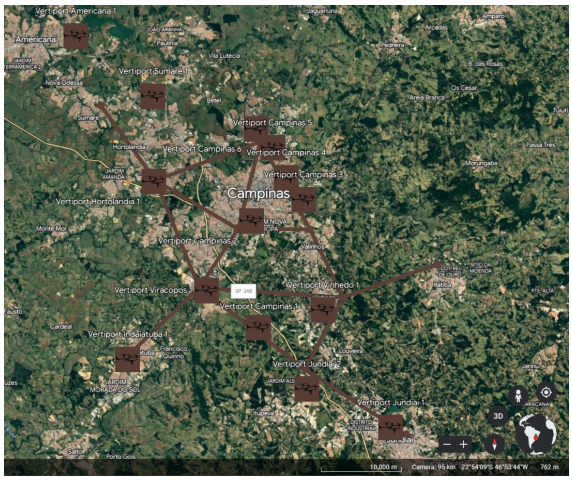


Figure 9 Vertiport locations for the LAN of Great Campinas using the already present helipads and airports.

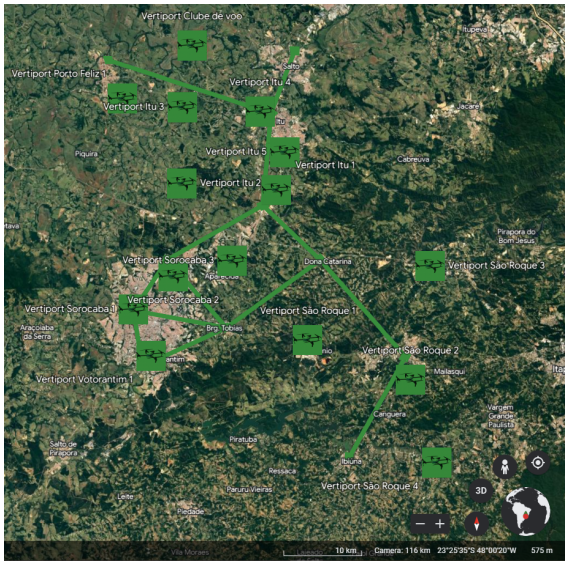


Figure 10 Vertiport locations for the LAN of Great Sorocaba using the already present helipads and airports.

Regarding the accessibility to essential services, the inhabitants of peripheral areas can expect to travel to hospitals, establishments of local authorities (*Poupatempo*, police battalions etc.) and big employment locations such as factories within a 15-minute time window with considerable ease, but only for specific destinations. As an example, *Colinas Shopping* in São José dos Campos can be accessed in just under 8 minutes by a local in the southern zone of the city - which would usually require about 45 minutes by public bus, but that is the only OD pair that actually becomes advantageous in the entire Great São José dos Campos.

However, the other 3 urban centers all show multiple OD pairs with good improvements in accessibility.

In the case of Great Campinas, such good outcome comes majoritarily by the Vertiports in 22°56'23.0"S 47°04'15.0"W and 22°51'28.0"S 47°02'42.0"W, which are two concentrations of economic activity, housing and near big avenues.

In the case of Great Sorocaba, the positive outcome involves mostly the proximity of Sorocaba and Itu, giving so many more easy options for the people who live between them, particularly in Aparecida (near Vertiport 23°26'43.0"S 47°23'22.0"W) - which can access central Sorocaba in 12 minutes instead of 30 minutes and access central Itu in 10 minutes instead of 25 minutes.

In the case of Great São Paulo, the busy areas on the western side of the city and into neighboring town of Osasco will see a boom in activity, where Osasco residents will be able to reach *Avenida Paulista* in about 12 to 15 minutes as opposed to the outrageous previous times of 60 to 80 minutes. Big São Paulo neighborhoods such as Itaquera, Vila Formosa and Anália Franco, alongside the towns of São Caetano do Sul and Mauá will still be very marginalized though, as no measurable gain will be obtained without the development of specific infrastructure for intraurban air transportation in these locations.

6. CONCLUSION

Of course, not all areas are well served with helipads, such as Brigadeiro Tobias and Dona Catarina in Great Sorocaba, Mauá and Santo André in Great São Paulo, Caçapava and Pindamonhangaba in Great São José dos Campos, Valinhos and Sumaré in Great Campinas. Nonetheless, having many Vertiports available also isn't enough, as even the Vertiports proposed in Campos do Jordão are on locations with low traffic and more close to touristic points than to essential services (which isn't a bad thing, it just doesn't serve the purpose of the study).

Not only that, but it becomes clear that interurban flights with eVTOL aircraft will be helpful immediately for the general public, as there is much travel time to be saved traversing the mountainous topography all around the biggest urban center in Brazil - the São Paulo Capital City metropolitan area - in a matter of interurban logistics, another pillar of AAM that the present study did not delve into.

It is noticeable that the pair Campinas - São Paulo is particularly costly for ground-based traveling, while the urban center of São José dos Campos can hardly grow in the South East - North West direction due to the steepness of the land. These observations suggest more feasibility of leveraging existing infrastructure for public interurban air transportation, instead of intraurban - which aligns with the conclusion of Pukhova et al. (2021).

Overall, the implications of this study greatly contribute to the efficacy of Advanced Air Mobility in promoting innovative air transportation solutions in Brazilian cities through AAM by bringing awareness to the necessity of having well-established objectives to ensure action is taken without hastiness.

7. REFERENCES

ANAC. (2023, Mai 2). *Agência Nacional de Aviação Civil. Lista de aeródromos civis cadastrados*. Retrieved Mai 2, 2023, from https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/lista-de-aerodromos-civis-cadastrados

Bachofner, M., Lemardelé, C., Estrada, M., Pagès, L.: City logistics: Challenges and opportunities for technology providers. **Journal of Urban Mobility**. v. 2, 2022. 10.1016/j.urbmob.2022.100020.

Happ, D., Karowski, N., Menzel, T., Watteyne, T., & Wolisz, A.: Enabling Cloud-Centric IoT with Publish/ Subscribe Systems. (2017). Ch. 10 in

Internet of Things: Challenges, Advances, and Applications. **CRC Press**. 10.1201/9781315155005-10.

IBGE. (2023, Jun 28). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2022*. Retrieved Sep 2, 2023, from https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/

Ikotun, A. M., Ezugwu, A. E., Abualigah, L., Abuhaija, B., Heming, J.: K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data, **Information Sciences**. v. 622, pp. 178-210, 2023. 10.1016/j.ins.2022.11.139.

Pukhova, A., Llorca, C., Moreno, A., Staves, C., Zhang, Q., Moeckel, R.: Flying taxis revived: Can Urban air mobility reduce road congestion?. **Journal of Urban Mobility**. v. 1, 2021. 10.1016/j.urbmob.2021.100002.

Raj, A. & Sah, B.: Analyzing critical success factors for implementation of drones in the logistics sector using grey-DEMATEL based approach, **Computers & Industrial Engineering**. v. 138, 2019. 10.1016/j.cie.2019.106118.

Rajendran, S. & Srinivas, S.: Air taxi service for urban mobility: A critical review of recent developments, future challenges, and opportunities. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**. v. 143, 2020. 10.1016/j.tre.2020.102090.

Ribeiro, J. K., Borille, G., Caetano, M., Silva, E. J.: Repurposing urban air mobility infrastructure for sustainable transportation in metropolitan cities: A case study of vertiports in São Paulo, Brazil. **Sustainable Cities and Society**. v. 98, 2023. 10.1016/j.scs.2023.104797.

Staricco, L.: 15-, 10- or 5-minute city? A focus on accessibility to services in Turin, Italy. **Journal of Urban Mobility**. v. 2, 2022. 10.1016/j.urbmob.2022.100030.

Incorporating No-Fly-Zones in Traveling Salesman Problem for Drones: A Case Study in Florianópolis/SC

Bruno Avelino
Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA)

Mauro Caetano
Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA)

Christopher Shneider Cerqueira
Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA)

*** Corresponding author e-mail address**: avel.bruno@gmail.com

PAPER ID: SIT2198

ABSTRACT

This study aims to address the Traveling Salesman Problem tailored for drone applications by considering the inclusion of No-Fly-Zones (NFZ). Unlike previous studies, this research incorporates the restricted areas in which drones are not allowed to fly into mathematical formulation. The study's main objectives are to optimize the drone's route in the presence of NFZ, using the city of Florianópolis/SC as the geographic context, and Nauru 500 from XMobots® as the selected drone model, a remote pilot electric vertical takeoff and land (eVTOL) aircraft. The methodology employed comprised several steps. Initially, five points of interest were meticulously chosen. Subsequently, the distance matrix was calculated using the Haversine formula. The optimal route was determined through Mixed Integer Programming (MIP) within the AMPL Tool and Gurobi Solver, incorporating the No-Fly Zone (NFZ) constraint. The suitability of the chosen model to execute the route was assessed against its characteristics. Finally, the obtained route was visualized using the QGIS tool. Our findings showcase an optimized route: Morro da Cruz-Estádio Ressacada-Ilha das Vinhas-Ponte Hercílio Luiz-Ponte Hercílio Luiz-Morro da Cruz. By incorporating DTCEA-FL as a No-Fly Zone (NFZ), the total distance amounts to 20.5 km. Remarkably, this distance aligns with the Nauru 500's endurance, achievable through vertical take-off and vertical landing, or alternatively, parachute-assisted landing. This research advances the comprehension of effective drone route planning with academic, military, and social impacts: addressing overlooked aspects in academia, enhancing military safety and compliance, and promoting safe drone use for privacy, security, and societal integration. Future research holds promise in exploring diverse avenues, including the incorporation of NFZ edges rather than points, investigating a variety of drone models and scenarios, and delving into situations where drones enter temporary NFZ.

Keywords: Air transport, Mathematical model, Optimization.

ACKNOWLEGDEMENTS

This study was supported in part by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPQ), Brazilian Army [Exército Brasileiro], Brazilian Air Force [Força Aérea Brasileira], and Brazilian Department of Airspace Control [Departamento de Controle do Espaço Aéreo-DECEA].

1. INTRODUCTION

Drones have witnessed significant growth in various military and civilian applications. However, the presence of NFZ poses unique challenges in planning the route for drones. NFZ are areas where drone flights are restricted due to safety, security, or legal reasons. Existing studies on the Traveling Salesman Problem (TSP) for drones have not explicitly considered the inclusion of NFZ in their mathematical formulations, limiting their practical applicability. This study aims to bridge this gap by introducing NFZ into the TSP formulation for drones. To do this, it will be considered the following objectives:

- Develop a mathematical formulation of the TSP considering NFZ for drone applications.
- Optimize the drone's route in the presence of NFZ in Florianópolis/SC, considering the specific characteristics of the remoted pilot eVTOL Nauru 500 from XMobots®.
- Provide insights and recommendations for efficient route planning for drones in scenarios involving NFZ.

By considering NFZ in the TSP formulation for drones, this research addresses a crucial aspect that has been overlooked in previous research. his incorporation is indispensable to ensure strict compliance with airspace regulations, elevate safety measures, and effectively deter unauthorized drone activities.

With the incorporation of NFZs into the TSP formulation, this study enriches drone route planning. It seeks to offer practical insights for optimizing routes while upholding airspace regulations and avoiding restricted zones. The research outcomes hold potential implications for diverse drone applications, amplifying their safety, efficiency, and legal compliance.

The paper's structure is as follows: Section 2 introduces a comprehensive literature review; Section 3 outlines the employed methodology; Section 4 exhibits the achieved results; and Section 5 concludes, pointing towards future research directions.

2. LITERATURE REVIEW

The Traveling Salesman Problem (TSP) is a combinatorial optimization problem extensively studied in the field of operational research. It involves finding the optimal route solution for a given set of nodes to be visited exactly once, returning from the starting node that minimizes travel cost (Applegate et al., 2011).

In Khoufi et al. (2019) study, various military, and civilian applications of the Traveling Salesman Problem (TSP) as trajectory optimization have been explored, including delivery-transportation, delay tolerance networks, intelligence, surveillance, and reconnaissance (ISR), monitoring, tracking, and filming using drones. However, numerous other potential applications have

emerged with the advancements in drone technology.

The advancements in TSP formulations are studied by Orman and Williams (2006) mathematical formulation of TSP, where there are eight distinct formulations of TSP as Integer Programming compared and their computational result on small problems are studied. Among these, Dantzig et al. (1954) is one of the classical mathematical formulations for TSP. Their formulation incorporates a degree constraint, subtour elimination, and integrality to ensure connectivity. However. the computational complexity of these constraints grows exponentially as the number of nodes increases, thus not solving the problem in a practical way.

In another study, Miller et al. (1960) addressed the issue of dimensionality by proposing a math formulation that introduces additional node potential variables, resulting in a polynomial number of constraints.

To analyze the recent literature that adapted TSP to drone applications in the context of the selection of path and trajectory, Khoufi et al. (2019) analyzed formulations and methods proposed, resulting in a classification and taxonomy of their problem and variations, including using drones with another way of transport as truck, as the study of Murray and Chu (2015).

The NFZ imposes another challenge for TSP by drones but is not considered in the studies above. So, this study considers restricted NFZ, proposing a math formulation of TSP considering NFZ and using the Florianópolis/SC scenario to show results and a Nauru 500 from XMobots as a Drone, as in Table 1.

Table 1 - Literature Review. Source: Research Data.

Author	Main Contribution
Dantzig et al. (1954)	TSP Math Formulation in which computational complexity of constraints grows exponentially as the number of nodes increases.
Miller et al. (1960)	TSP Math Formulation that introduces additional node potential variables, resulting in a polynomial number of constraints.
Orman and Williams (2006)	Advancement in the mathematical formulation of TSP in eight distinct formulations as Integer Programming
Khoufi et al. (2019)	Analyze the recent literature that adapted TSP to drone applications in the context of the selection of path and trajectory
This study	Math formulation of TSP considering NFZ, using Florianópolis/SC Brazil and XMobots Nauru 500 as scenario.

3. METHODOLOGY

In this section, it is presented the methodology employed to address the problem of optimizing drone routing considering NFZ.

As part of the initial phase, five points were carefully selected in Florianópolis/SC. These points include: Morro da Cruz (-27.5879, -48.5337), Ponte Hercílio Luiz (-27.5937, -48.5659), Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Florianópolis/SC - DTCEA-FL (-27.6665, -48.5411), Estádio Ressacada (-27.6663, -48.5316), and Ilha das Vinhas (-27.6145, -48.5513).

The selection was based on their significance for surveillance and delivery purposes in military and civilian applications. Additionally, it is worth noting that DTCEA-FL is designated as an NFZ, further emphasizing its importance in terms of airspace control and regulations.

Next, from the decimal latitude and longitude of two points, and radius of the earth R = 6371.009 km (Azdy and Darnis, 2020), the distance Great Circle Distance (GCD) is evaluated using Haversine Formula

$\text{GCD (km)} = \text{R (km)} * \theta \text{ (radians)}$ (1)

$\theta =$

$2 \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \Delta L + cosL_1 * cosL_2 * \sin^2 \Delta G}$ (2) ,

where L_1 is the latitude of first point (radians); L_2 is the longitude of second point (radians); ΔL is the half difference of two points in Latitude (radians); ΔG is the half difference of two points in Longitude (radians).

From the considered locations and haversine formula, the distance matrix is generated as in Table 2.

Table 2 - Distance Matrix. Source: Research Data.

	Morro da Cruz	*Ponte Hercílio Luiz*	*DTCEA-FL*	*Estádio Ressacada*	*Ilha das Vinhas*
Morro da Cruz	0,00	3,10	8,77	8,72	3,39
Ponte Hercílio Luiz	3,10	0,00	8,43	8,72	2,65
DTCEA-FL	8,77	8,43	0,00	0,94	5,90
Estádio Ressacada	8,72	8,72	0,94	0,00	6,10
Ilha das Vinhas	3,39	2,65	5,90	6,10	0,00

Using the identified Locations (L), NFZ, calculated Drone Distance Matrix ($d_{i,j}$), a drone routing solution is generated, considering the restrictions imposed by the NFZ, as in Figure 1.

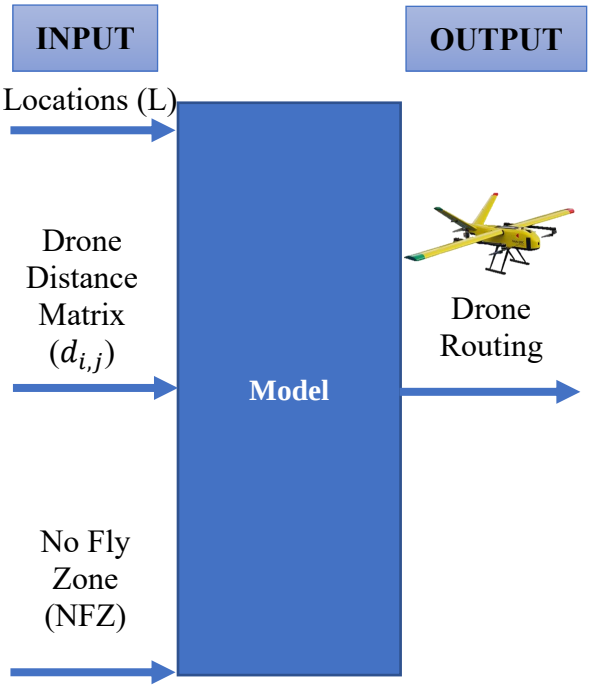


Figure 1 - Black Box Diagram of the Model. Source: Research Data.

The model described in Figure 1 is implemented using the mathematical programming language AMPL and Solver Gurobi, where from the model file and data file, a solution for drone routing with minimum distance considering NFZ is calculated, as can be shown in Figure 2.

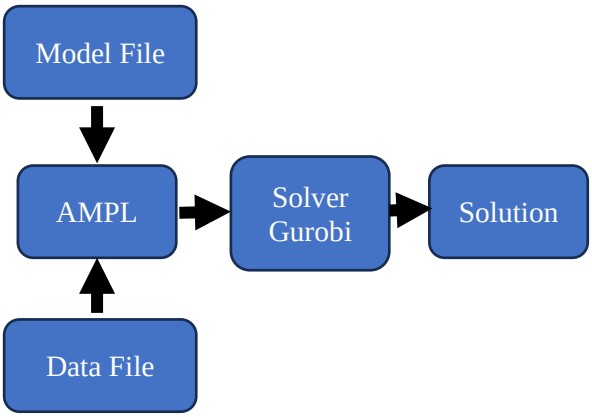


Figure 2 -Methodology. Source: Research Data.

To validate the feasibility of the drone routing solution using real equipment used in both civilian and military applications, the Nauru 500 drone is employed. The choice of the Nauru 500 is because the Brazilian Army possesses a drone from the XMobots Nauru Family, and it is also part of a collaborative project between XMobots and CEI-ITA. By utilizing the Nauru 500, the practical implementation and performance of the proposed solution can be assessed, ensuring its applicability in real-world scenarios.

Table 3 - Drone characteristics. Source: XMobots (2023).

Drone Nauru 500 Characteristics	
Autonomy	40 h
Endurance	60 km
Payload	25 Kg
Power Capacity	Battery and Combustion
Take off and Land	Vertical Take-Off and Land (VTOL) with the inclusion of a parachute as an alternative landing method

From these characteristics in Table 3, autonomy, endurance, take-off, and land will be verified in the routing solution.

4. RESULTS

The following section presents the results of the study, including a math model symbol description, math model formulation of the TSP variant considering NFZ, an optimal route solution in the QGIS tool, and drone route validation.

The mathematical model, illustrated in Figure 1 and Figure 2, utilizes the following parameters: $d_{i,j}$ represents the distance between source location i and destination location j, which is evaluated using the Haversine formula (1) and (2). N denotes the total number of locations involved. Within the mathematical mode, the binary variable $x_{i,j}$ is employed to determine connections between locations i and j, in accordance with the objectives and constraints. Additionally, the auxiliary variable u_i is utilized to make decisions based on the Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) approach for subtour elimination. The sets L, NFZ, and FL are employed to describe all locations, locations within NFZ, and allowed locations, respectively. These details are summarized in Table 4.

Table 4 - Math Model Symbol Description.

Source: Research Data

PARAMETERS	
$d_{i,j}$	Geographical distance between locations i and j
N	The cardinality of the set Locations
DECISION VARIABLE	

$x_{i,j}$	Binary variable denoting the presence of a link between locations *i* and *j*
AUXILIARY VARIABLE DECISION	
u_i	Sub-tour elimination integer variable based on the Miller-Tucker-Zemlin approach
SETS	
L	Set of Places
$sNFZ$	Set of No-Fly-Zone Places
FL	Set of allowed location
INDEX	
i, j	Source and Destiny indexes

Subsequently, the mathematical models strive to minimize the distance covered, as indicated by Equation 3, while being subject to:

- Constraint of "arriving and departing once" guarantees that every location is visited and departed from exactly once, as illustrated in Equation 4.
- Constraint of "departing from and returning to a fixed point" rigorously mandates the flight to initiate and conclude at a designated location, as explicitly stated in Equation 5.
- Constraint of the NFZ sternly forbids any connections to or from the specified restricted airspace, encapsulated within Equation 6.
- Constraint to incorporate subtour elimination, based on Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) formulation (Equation 7), effectively eradicating sub-tours formation.
- Finally, the variables are defined as: decision variable $x_{i,j}$, representing a binary variable that indicates the existence of a connection between locations i and j. The variable u_i represents an integer in the model. And the initial integer variable, u_1, is constrained to have a fixed value of 1, as in Equation 8.

$$\min \sum_{i,j \in L} d_{i,j} * x_{i,j} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in L, i \neq j} x_{i,j} = \sum_{i \in L, i \neq j} x_{j,i} = 1 \ \forall i \in FL \ (4)$$

$$\sum_{i \in L} x_{i,1} = \sum_{j \in L} x_{1,j} = 1 \ (5)$$

$$x_{i,j} = x_{j,i} = 0 \ \forall i \in L, \forall j \in sNFZ, i \neq j \ (6)$$

$$u_i - u_j + N * x_{i,j} \leq (N-1), \forall i, j \in L, i \neq j \quad (7)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\}, u_i \in Z^+, u_1 = 1 \ (8)$$

The goal of this mathematical model is to minimize the distance expressed by Equation 3, while subjected to constraints outlined in Equations 4 to 8.

The constraint in Equation 4 ensures that for each location in the feasible locations (FL) excluding the NFZ, there's exactly one edge coming into the location and one edge leaving the location. This means that each location is visited only once.

Equation 5 mandates that exactly one edge is leaving from location 1 and exactly one edge is returning to location 1. This ensures that the salesperson's journey starts and ends at location 1.

Equation 6 enforces that there are no edges between cities in the NFZ and any other location. Additionally, Equation 7 presents a part of subtour elimination methods. They ensure that if there is a connection between locations, the auxiliary variable u_i minus u_j, adjusted by N times $x_{i,j}$, is at most N−1. This helps prevent the formation of smaller disconnected cycles within the larger tour.

Equation 8 defines the nature of the variables: $x_{i,j}$ is a binary variable that indicates the presence (1) or absence (0) of an edge between locations; u_i is a non-negative integer auxiliary variable; $u_1 = 1$ initializes the auxiliary variable for Location 1 – Morro da Cruz.

These equations together form a mathematical representation of the Traveling Salesman Problem (TSP) with an additional constraint of NFZ. The goal is to find the optimal arrangement of edges (connections) that satisfies these constraints and minimizes the total distance traveled.

Following the methodological procedure in Section III, the model successfully attained the optimal solution of 20.5 km. This accomplishment was attained by considering the route Morro da Cruz – Estádio Ressacada (8.7 km), Estádio da Ressacada-Ilha das Vinhas (3.1 km), Ilha das Vinhas- Ponte Hercílio Luiz (6.1 km), and Ponte Hercílio Luiz-Morro da Cruz (2.6 km), as Illustrated in drone path of Figure 3.

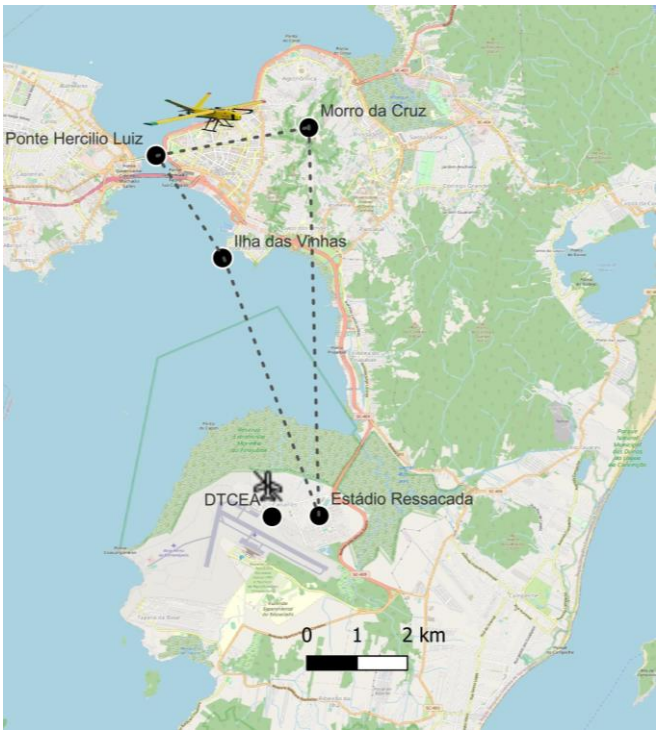


Figure 3 - Drone Routing Solution. Source: Research Data.

The 20.5 km route is well-suited for the Nauru 500, thanks to its 60 km endurance and 40-hour autonomy.

The combination of VTOL and Parachuting Land shows advantages,

particularly due to the conditions at Morro da Cruz for takeoff and landing, a scenario where conventional runways or landing areas are unavailable, difficult, or impractical.

5. CONCLUSION

In this study, it is addressed the challenge of incorporating NFZ in TSP formulation for drones. It achieved the objectives with a proposal of a mathematical formulation that integrates NFZ into the TSP model, enabling efficient route planning for drones while ensuring compliance with airspace regulations; an optimization of the drone's route in the presence of NFZ in Florianópolis-SC with a Drone XMobots Nauru 500, employing optimization techniques to minimize the total distance traveled by the drone while avoiding the restricted area in Florianópolis-SC, offering practical insights and recommendations for optimizing drone routes, enhance safety, and complying with legal requirements in real-world applications.

Future research presents opportunities to delve into multiple avenues, encompassing the integration of NFZ edges into mathematical formulations, the exploration of varied drone models and scenarios, and the examination of cases involving drones entering temporary NFZs.

This research has academic, military, and social impacts. In academics, it contributes to the address of a crucial aspect that has been overlooked in previous research, which is the inclusion of NFZ in TSP formulation. In the military, it contributes to enhancing safety, complying with airspace regulations, and preventing unauthorized drone activities in restricted areas. In social, it lies in promoting the safe and responsible use of drones in civilian applications, ensuring the privacy and security of individuals, preventing disruptions in sensitive areas, and facilitating the integration of drones into aerial surveillance, disaster management, and delivery services.

In conclusion, this study achieved its objectives by developing a mathematical formulation, optimizing drone routes in the presence of NFZ, and providing practical insights for efficient route planning.

6. REFERENCES

Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., & Cook, W. J. (2011). *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study*. Princeton University Press. www.tsp.gatech.edu

Azdy, R. A., & Darnis, F. (2020). Use of Haversine Formula in Finding Distance between Temporary Shelter and Waste End Processing Sites. *Journal of Physics: Conference Series*, *1500*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012104

Dantzig, G., Fulkerson, R., & Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, *2*(4), 393–410.

Khoufi, I., Laouiti, A., & Adjih, C. (2019). A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles. *Drones*, *3*(3), 1–30. https://doi.org/10.3390/drones3030066

Miller, C., Tucker, A., & Zemlin, R. A. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM (JACM)*, *7*(4), 326–329.

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

Orman, A., & Williams, H. P. (2006). A Survey of Different Integer Programming Formulations of the Travelling Salesman Problem. *Optimisation, Econometric and Financial Analysis*, *9*, 93–108.

XMobots. (2023). *Nauru 500C VTOL – Mapeamento - XMobots®*. https://xmobots.com.br/nauru-500c-vtol/

XX SITRAER

2023 UFSC

AIR TRANSPORTATION SYMPOSIUM

OCTOBER 18-20

JOINVILLE

SC/BRAZIL

ORGANIZERS

SBTA

Scientia via lucis

UFSC Joinville

SPONSOR

CAPES

SUPPORTERS

DECEA

ANAC

ITA

FLORIPA AIRPORT

BOURBON Joinville Convention Hotel

SITA

Azul

ESCOLA DO TEATRO BOLSHOI NO BRASIL

INFRA S.A.

ÁGORA TECH PARK

FLYBIS

Joinville e Região Convention & Visitors Bureau

Prefeitura de Joinville

CULTURA E TURISMO

DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E INOVAÇÃO

UDESC UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

ABMS Núcleo Regional Paraná/Santa Catarina

Associação Brasileira das Empresas Aéreas

ABEAR