



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MARIANA PAIVA BRITO

**UMA HEURÍSTICA DE BUSCA LOCAL PARA UM PROBLEMA
PARCIALMENTE IRRESTRITO DE POUSO DE AERONAVES:
UM ESTUDO DE CASO**

**SUMÉ - PB
2024**

MARIANA PAIVA BRITO

**UMA HEURÍSTICA DE BUSCA LOCAL PARA UM PROBLEMA
PARCIALMENTE IRRESTRITO DE POUSO DE AERONAVES:
UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Produção.

Orientador: Professor Dr. Yuri Laio Teixeira Veras Silva.

**SUMÉ - PB
2024**



B862h Brito, Mariana Paiva.

Uma heurística de busca local para um problema parcialmente irrestrito de pouso de aeronaves: um estudo de caso. / Mariana Paiva Brito. - 2024.

68 f.

Orientador: Professor Dr. Yuri Laio Teixeira Veras Silva.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de Engenharia de Produção.

1. Heurística de busca local. 2. Estudo de caso. 3. Pouso de aeronaves. 4. Atraso de vôos. 5. Atraso de pousos - aeronaves. 6. Tráfego aéreo. 7. Modelagem matemática. 8. Aircraft landing problem. I. Silva, Yuri Laio Teixeira Veras. II. Título.

CDU: 656.7(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

MARIANA PAIVA BRITO

**UMA HEURÍSTICA DE BUSCA LOCAL PARA UM PROBLEMA
PARCIALMENTE IRRESTRITO DE POUSO DE AERONAVES:
UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia de Produção.

BANCA EXAMINADORA:

**Professor Dr. Yuri Laio Teixeira Veras Silva.
Orientador – UAEP/CDSA/UFCG**

**Professora Dra. Maria Creuza Borges de Araújo.
Examinadora I – UAEP/CCT/UFCG**

**Professora Dra. Aline Amaral Leal Barbosa.
Examinadora II – UAEP/CDSA/UFCG**

Trabalho aprovado em: 08 de outubro de 2024.

SUMÉ - PB

*Ao meu irmão Leonardo Soli Brito, que na força e amor
das crianças me faz acreditar na sabedoria de
encantamento puro.*

AGRADECIMENTOS

Regracio, à minha espiritualidade por sempre guiar meu orí e acompanhar meus caminhos, ser acalento nos momentos difíceis e fazer florescer a gratidão no meu coração em bons momentos, elucidando as crianças que cantam com Hariel e Gilberto Gil "minha ideologia é nascer de cada dia e minha religião é a luz na escuridão". Odayá, minha mãe Iemanjá! Nas mandigas que a gente não vê, mil coisas que a gente não crê, valei-me meu pai Atotô, Obaluaê! Saravá, meus guias!

Aos meus avós maternos, Maria Fernanda e José Beijamim, por serem meu pilar de força, sabedoria e amor durante a minha graduação e a minha história, por acreditarem e me apoiar para trilhar o caminho nas veredas do ensino.

Aos meus avós paternos, Gildete e Adolfo, por durante todo o meu caminho sempre buscarem me apoiar e me encorajarem a seguir meus sonhos, encarando todas as renúncias que foram feitas durante o processo.

Aos meus pais, Jaqueline e Fábio, por serem minha referência e inspiração, esses que sempre me ensinaram que posso ser forte e corajosa para alçar todos os voos que aspiro e defender aquilo que acredito.

À Mãe Mazukele, Ialorixá da Roça Dandalunda, por abrir as portas da sua casa, perpetrando em mim o sentimento de que ali também sempre foi a minha morada, e por meio do seu letramento ancestral me guiar para busca de boas marés, me acalantar e me cuidar. Aos meus irmãos de santo, por me ensinarem que aspirações coletivas alimentam na alma lindos anseios.

Aos meus tios, Cristina, Sheila e Robson, por sempre me indicarem que posso contar com eles para perseverar em todas as trajetórias da minha vida.

Aos meus primos, Julia e Gabriel, que juntamente com Leonardo, são os melhores dos irmãos, e me ensinarem todos os dias que dentro de mim eles são caminho para transformação e para construção de conhecimento dos afetos, mostrando que o itinerário da nossa história pode ser leve e tranquilo.

À Márcia, Karina, Ana Carolina, Larissa, Cleide e Giuseppe que durante o percurso da vida me ensinaram que laços afetivos construídos são tão gigantes quanto laços sanguíneos, agradeço por serem nascedouro de inspiração, poesia, apoio, escuta e amor.

Aos meus familiares, que de alguma forma corroboraram para minha formação pessoal, afetiva e acadêmica.

À Ariadne, por toda a partilha durante a graduação e a vida, por aprendermos juntas como trilhar o nosso próprio caminho, tanto no rito de passagem para vida adulta, como na nossa profissão. À família de Ariadne, por me acompanharem, de coração aberto, na construção da minha graduação, sempre cooperando para o nosso melhor desenvolvimento.

A todos os meus grandes amigos, construídos e cativados nos âmbitos acadêmicos e pessoais, por serem refúgio, acalmaria, ternura, aprendizado e sutileza em todas as conjunções que puderam ser partilhadas comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Yuri Laio, por todo conhecimento compartilhado, por toda paciência e empenho dedicados a orientação desse trabalho, e para além disso, por acreditar e viabilizar a construção desse, agradeço todas as vivências construídas em sala de aula e na iniciação científica.

A todos os professores que passaram pela minha trajetória acadêmica e contribuíram para minha formação, sobretudo, a professora Vanessa Nóbrega, que desde o início da minha formação técnica, mediante ao seu empenho à pesquisa na área de engenharia de produção, transmitiu para mim princípios e conhecimentos que delinearam a minha admiração pelo âmbito científico.

A todos os colaboradores e servidores da Universidade Federal de Campina Grande, especialmente, os do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido (CDSA/UFCG).

RESUMO

A sobrecarga e a insuficiência de oferta no tráfego aéreo, ocasionam desequilíbrios nos sistemas aeroportuários, o que tem como consequências, o aumento nos custos operacionais, atrasos recorrentes nos voos e desconforto para os passageiros. Esses fatores, são problemáticas enfrentadas frequentemente no setor, e estabelecem adversidades nos processos operacionais, afetando assim diretamente, a eficiência e a qualidade dos serviços oferecidos por aeroportos e companhias aéreas. Dessa forma, o objetivo desse estudo é elaborar uma heurística de otimização fundamentada em busca local para o problema de pouso de voo em um aeroporto com pista de pouso e decolagem única, essa abordagem realiza empenhos para aprimorar a eficiência operacional e o gerenciamento de tráfego aéreo. A metodologia empregada para alcançar o objetivo da pesquisa, é classificada como aplicada quanto à natureza, quanto à abordagem, aos objetivos e aos procedimentos técnicos é caracterizada, respectivamente, como quantitativa, exploratória e estudo de caso. Assim, o estudo foi realizado em seis etapas, são elas, uma coleta de dados em um base real para construir as instâncias aplicadas na abordagem heurística, um embasamento bibliográfico, a compreensão acerca da modelagem matemática do *aircraft landing problem*, a construção do método heurístico, a execução dos resultados computacionais e a análise estatística desses resultados. Os resultados obtidos demonstraram que a heurística proposta é eficiente para geração de possíveis soluções, com tempos de execução computacional viáveis. Arelado a isso, nos experimentos feitos a partir de três instâncias baseadas em dados do Aeroporto Internacional de Recife/Guararapes, as divergências totais médias encontradas estão entre 3875 UT e 3945 UT, com desvio padrão entre 310,4 UT e 321 UT para as dez execuções que as instâncias foram submetidas. Em síntese, a abordagem proposta foi determinada como uma ferramenta funcional e prática para gestão do tráfego aéreo.

Palavras-chave: *Aircraft Landing Problem*; Heurística de busca local; Atraso de pouso de voo; Tráfego aéreo.

ABSTRACT

The overload and insufficient supply of air traffic lead to imbalances in airport systems, resulting in increased operational costs, frequent flight delays, and passenger discomfort. These factors are recurring issues in the sector and create challenges in operational processes, thus directly affecting the efficiency and quality of services offered by airports and airlines. Therefore, this study aims to develop an optimization heuristic based on local search to solve the aircraft landing problem at an airport with a single runway. This approach aims to improve operational efficiency and air traffic management. The methodology used to achieve the research objective is classified as applied in nature, and in terms of approach, goals, and technical procedures, it is characterized as quantitative, exploratory, and case study, respectively. The study was carried out in six stages: data collection from a real database to build the instances used in the heuristic approach, a literature review, an understanding of the mathematical modeling of the aircraft landing problem, the construction of the heuristic method, the execution of computational results, and the statistical analysis of these results. The results showed that the proposed heuristic efficiently generates possible solutions with feasible computational execution times. Additionally, in experiments based on three instances using real data from Recife/Guararapes International Airport, the average total discrepancies ranged from 3875 UT to 3945 UT, with a standard deviation between 310.4 UT and 321 UT for the ten executions that the instances underwent. In summary, the proposed approach was determined to be a functional and practical tool for air traffic management.

Keywords: Aircraft Landing Problem; Local search heuristic; Flight landing delay; Air traffic.

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 -	Avaliação da solução inicial.....	50
Algoritmo 2 -	Busca local.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Sistematização da estrutura do trabalho.....	19
Figura 2 -	Ilustração dos lados ar e terra de um aeroporto.....	24
Figura 3 -	Operações de pouso e decolagem.....	26
Figura 4 -	Sistematização de heurísticas e meta-heurísticas.....	32
Figura 5 -	Representação de pousos de aeronaves.....	35
Figura 6 -	Mapeamento do <i>aircraft landing problem</i>	36
Figura 7 -	Caracterização da pesquisa científica.....	39
Figura 8 -	Fluxo metodológico do estudo.....	41
Figura 9 -	Processo de construção da coleta de dados.....	41
Figura 10 -	Representação temporal de um pouso executado após o horário alvo.....	45
Figura 11 -	Representação temporal de um pouso executado antes do horário alvo	45
Figura 12 -	Troca de posições na heurística de busca local.....	46
Figura 13 -	Gráfico de representação da busca local.....	47
Figura 14 -	Funcionamento do algoritmo heurístico LS.....	48
Figura 15 -	Gráfico de séries temporais das divergências totais resultadas na instância 1.....	53
Figura 16 -	Gráfico de séries temporais das divergências totais resultadas na instância 2.....	53
Figura 17 -	Gráfico de séries temporais das divergências totais resultadas na instância 3.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modelo matemático do <i>aircraft landing problem</i>	44
Quadro 2 - Descrição e comparativo das variáveis.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divergências totais advindas dos sequenciamentos propostos pelo algoritmo LS.....	52
Tabela 2 - Parâmetros de estatística descritiva para as divergências totais das instâncias.....	54

LISTA DE SIGLAS

- ACO** – *Ant Colony Optimization* (Algoritmo da colônia de formigas)
- ALP** – *Aircraft Landing Problem* (Problema de Pouso de Aeronaves).
- ANAC** – Agência Nacional de Aviação Civil
- CRO** – *Chemical Reaction Optimization* (Otimização por reações químicas)
- CSA** – *Clonal selection algorithm* (Algoritmo de seleção clonal)
- EP** – *Evolutionary Strategies* (Programação evolutiva)
- ES** – *Evolutionary Programming* (Estratégias evolutivas)
- GA** – *Genetic Algorithm* (Algoritmo genético)
- GLS** – *Guided local search* (Busca local guiada)
- GWO** – *Grey Wolf Optimizer* (Otimizador do lobo cinzento)
- IATA** – *International Air Transport Association* (Associação Internacional de Transporte Aéreo).
- ICA** – *Imperialist competitive algorithm* (Algoritmo competitivo imperialista)
- ICAO** – *International Civil Aviation Organization* (Organização da Aviação Civil Internacional)
- ILS** – *Iterated Local Search* (Busca local iterada)
- IWO** – *Invasive Weed Optimization* (Infestação de ervas daninhas)
- LS** – *Local Search* (Busca local)
- MA** – *Memetic Algorithm* (Algoritmo memético)
- PSO** – *Particle Swarm Optimization* (Otimização por enxame de partículas)
- SA** – *Simulated Annealing* (Recozimento simulado)
- TS** – *Tabu Search* (Pesquisa tabu)
- UT** – Unidades de Tempo.
- VBA** – Visual Basic for Applications
- VNS** – *Variable Neighborhood Search* (Vizinhança variável)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	MERCADO AEROPORTUÁRIO.....	21
2.1.1	Operações aeroportuárias.....	24
2.2	GERENCIAMENTO DE ATRASOS NO SETOR AÉREO: DESAFIOS E IMPACTOS.....	27
2.3	HEURÍSTICAS DE OTIMIZAÇÃO.....	31
2.4	AIRCRAFT LANDING PROBLEM.....	34
2.5	TRABALHOS RELACIONADOS.....	36
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	39
3.2	ETAPAS DA PESQUISA.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	DESCRIÇÃO DO <i>AIRCRAFT LANDING PROBLEM</i>	43
4.2	HEURÍSTICA DE BUSCA LOCAL.....	45
4.3	HEURÍSTICA LS PARA O <i>AIRCRAFT LANDING PROBLEM</i>	48
4.3.1	Geração da solução inicial.....	49
4.3.2	Avaliação da solução.....	49
4.3.3	Busca local.....	50
4.3.4	Mecanismo de perturbação.....	51
4.4	RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

O tráfego aéreo vem crescendo exponencialmente ao longo dos anos, em virtude de proporcionar agilidade, rapidez e eficiência para os setores logísticos, comerciais e, também, para passageiros convencionais. Em vista disso, a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) estima que em 2036, 7,8 bilhões de passageiros irão utilizar o transporte aéreo, sendo essa demanda o dobro do ano de 2016.

Contudo, de acordo com Zhang et al. (2020) apesar do aumento da busca por serviços aéreos, o crescimento proporcional da oferta, não ocorreu, gerando assim, o congestionamento no controle de tráfego aéreo, o consumo exacerbado de combustível e conseqüentemente, a alta emissão de gases poluentes na atmosfera. Portando, a sobrecarga e a escassez de oferta no tráfego aéreo geram instabilidade nos sistemas aeroportuários, onde custos elevados, voos atrasados e passageiros desconfortáveis se tornam problemas habituais, formando gargalos dentro dos processos produtivos do setor (Pamplona et al., 2021).

Dessa maneira, é imprescindível que seja estabelecido um gerenciamento de fluxo que seja eficiente e eficaz, e proporcione o aumento dos níveis de segurança e capacidade de pousos e decolagens dos aeroportos, para assim, alcançar maiores lucros, elevar o patamar dos serviços e consolidar a competitividade entre as companhias aéreas no mercado (Liu et al., 2018).

Além disso, segundo Salehipour, Modarres e Naeni (2013), o transporte aéreo possui papel importante dentre os modais de transporte, esse possui um alto valor agregado, e por essa razão, os custos associados ao desvio dos horários planejados de pouso são também proporcionalmente altos, e o distanciamento do pouso alvo gera prejuízos substanciais para as companhias aéreas. Portanto, o *aircraft landing problem* procura o planejamento ótimo de pouso para as aeronaves de acordo com as pistas dos aeroportos e sequenciamento de horário, a fim de reduzir o desvio total do tempo alvo de pouso, considerando que tanto antecipações quanto atrasos, geram penalizações de custos.

Sendo assim, de acordo com Murça e Muller (2014), o *Aircraft Landing Problem* (ALP) atua no gerenciamento de fluxos de aterrissagens, a partir da avaliação de sequenciamentos e programações de pouso que devem ser realizadas sob a condição de restrições operacionais, como os critérios de separação de acordo com a categoria da aeronave, a estrutura do sistema de pistas e qual a estratégia utilizada para designar o sequenciamento de voos, para o ALP, aplica-se programação matemática para obter abordagens de otimização no setor.

Na literatura, são sugeridas abordagens para resolução do ALP, sendo segmentadas em exatas, heurísticas e metaheurísticas. Consoante à Azevedo, Rocha e Pereira (2024), as abordagens exatas são efetivas em problemas de pequenas instâncias, utilizando programação linear, programação inteira mista, programação dinâmica, algoritmos polinomiais exatos, entre outros métodos determinísticos.

Por sua vez, as heurísticas e metaheurísticas são utilizadas em modelos de otimização, buscando uma aproximação da solução ótima em um curto espaço de tempo, essas aplicam mecanismos como a simulação de recozimento (SA), algoritmos genéticos (GA), o algoritmo da colônia de formigas (ACO), heurísticas de busca local, otimização de enxame de partículas (PSO) e pesquisa de vizinhança variável (Ikli et al., 2021; Hammouri et al., 2020).

Nesse sentido, o objetivo dessa pesquisa é desenvolver uma heurística de otimização, fundamentada em busca local para o *aircraft landing problem* caracterizado como parcialmente irrestrito em um aeroporto com pista de pouso e decolagem única. De forma mais específica, a pesquisa foi direcionada para proceder com uma coleta de dados reais em um aeroporto internacional, utilizando as principais plataformas de tráfego aéreo, desenvolver um algoritmo heurístico de busca local para o *aircraft landing problem* com pista de pouso única e realizar uma análise detalhada dos resultados experimentais alcançados, tendo em vista os principais estudos presentes na literatura, considerando a problemática da otimização do processo de pouso de aeronaves em um aeroporto internacional.

1.1 OBJETIVOS

Para determinação de uma possível resolutive para a problemática envolvida, foram deliberados um objetivo geral e objetivos específicos para esse estudo.

1.1.1 Objetivo Geral

Elaborar uma heurística de otimização fundamentada em busca local para um *aircraft landing problem* (ALP) parcialmente irrestrito, a ser aplicada em instâncias de dados coletadas e estruturadas a partir de um aeroporto de médio porte.

1.1.2 Objetivos específicos

Com a finalidade de conceber o objetivo geral foram estabelecidos objetivos específicos, são eles:

- Coletar dados reais em um aeroporto internacional utilizando uma plataforma de tráfego aéreo;
- Desenvolver um algoritmo heurístico de busca local para otimizar o sequenciamento de pousos;
- Identificar a função objetivo, as variações de decisão e as restrições a serem consideradas para o *aircraft landing problem* a ser tratado;
- Desempenhar uma análise acerca dos resultados experimentais obtidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O modal de transporte aéreo é elementar tanto para o transporte de passageiros convencionais em voos domésticos, como para o comércio nacional e internacional, nesse sentido, de acordo com Dixit e Jakhar (2021), o setor de aviação registrou um crescimento exponencial nos últimos anos, os autores ainda reiteram que esse crescimento está relacionado à externalidades econômicas positivas e também, a conectividade estabelecida pelo modal.

Segundo dados da Associação Internacional de Transporte Aéreo, o tráfego aéreo global de cargas e passageiros vem crescendo exponencialmente, com isso, a perspectiva prevista pela instituição é que o número de consumidores desse transporte seja avaliado em 8,2 bilhões de usuários até 2037 (IATA, 2023). Dessa forma, esse crescimento não apenas reflete uma maior mobilidade de passageiros, mas também um aumento significativo na complexidade das operações de transporte aéreo.

Contudo, o aumento da demanda não é associado ao beneficiamento das infraestruturas aéreas, gerando assim uma superlotação das edificações, e com isso, são processadas adversidades de gerenciamento em todas as atividades intrínsecas ao setor, bem como são resultados congestionamentos severos, tanto nas pistas de pouso e decolagem quanto nas áreas de embarque e desembarque (Chagas, 2022).

Desse modo, os serviços aeroportuários apresentam inúmeros transtornos contínuos, como voos atrasados, ligações perdidas, congestionamento dentro dos terminais do aeroporto, ausência de lugares para estacionar as aeronaves e tempos de espera mais longos para o *check-in*, essas problemáticas são decorrentes da escassez perene na oferta (Dixit e Jakhar, 2021).

Diante disso, para Zhang et al. (2020), o estudo do *aircraft landing problem* pode proporcionar a melhora do desempenho pontual dos aeroportos, aumentar a utilização de pistas, reduzir a carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo e manter a concorrência leal entre as companhias aéreas.

Ademais, segundo Veresnikov et al. (2019), o conhecimento do ALP é elementar para o planejamento e regulação dos fluxos de tráfego aéreo, com isso são necessários métodos matemáticos para realizar a construção da solução, sendo essa uma investigação elementar, para além de discutir sobre o descomedimento em atividades aéreas, o estudo sobre esse, também proporciona uma solução prática que pode ser implementada para otimizar as operações dos aeroportos e aprimorar a experiência do passageiro.

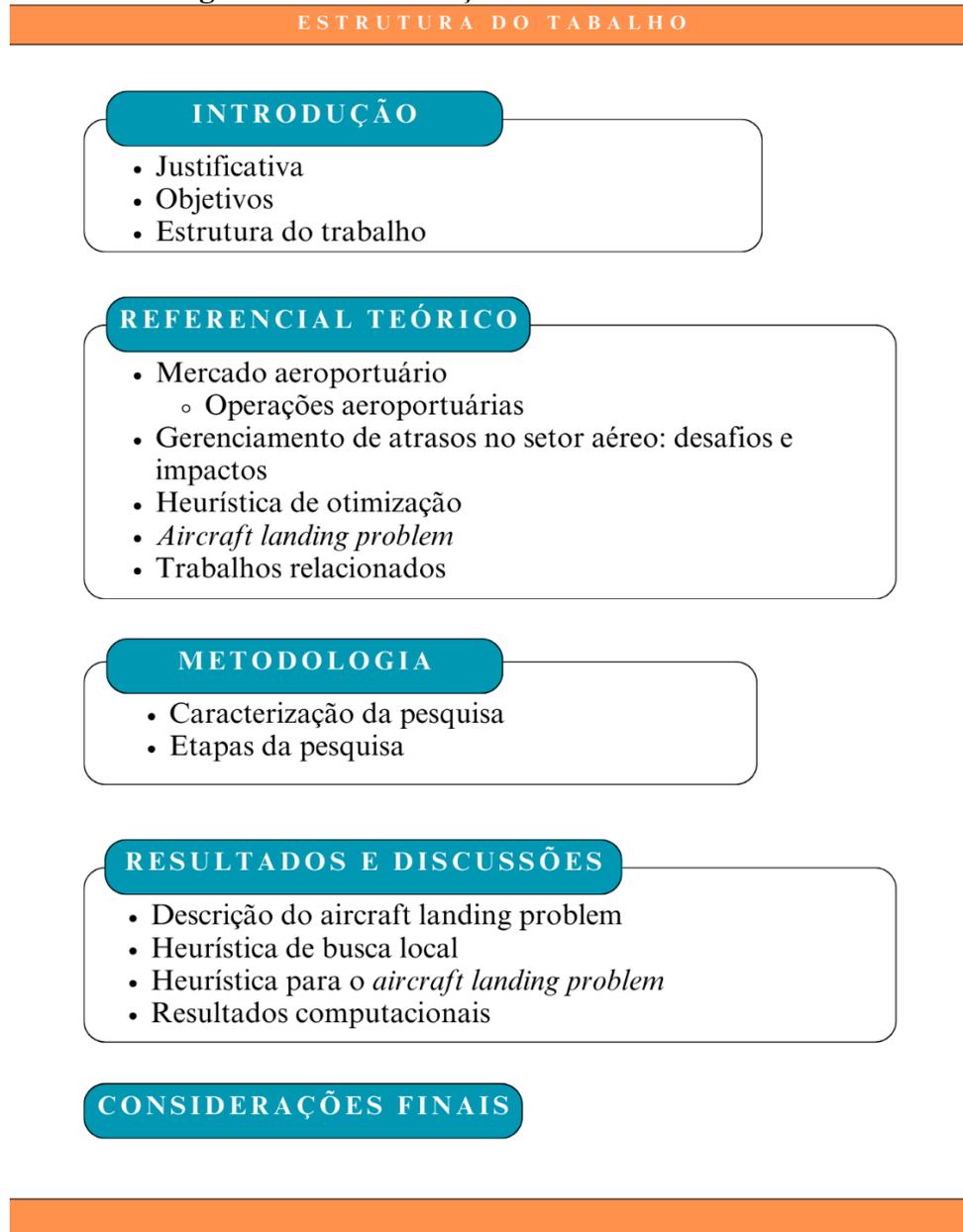
Dessa maneira, além de contribuir para a literatura acadêmica, os resultados deste estudo têm o potencial de influenciar diretamente as políticas de gestão aeroportuária e a tomada de decisões nas companhias aéreas, visto que por meio do desenvolvimento de uma heurística de otimização para o ALP, é possível alcançar eficiência operacional, reduzir custos e aumentar a capacidade de atendimento, o que, por sua vez, gera um crescimento econômico eficiente no setor.

No que diz respeito a contribuição acadêmica, o desenvolvimento de heurísticas de otimização para o *aircraft landing problem* envolve áreas das ciências exatas, dessa forma, é necessário agregar conhecimentos de engenharia, matemática e computação, para que assim, sejam compreendidas as problemáticas de múltiplas variáveis e restrições. O trabalho tem como base a modelagem de um problema, a análise de dados e o desenvolvimento de um algoritmo de busca local, sendo assim, esse corrobora para o avanço do conhecimento na área de otimização e pesquisa operacional.

O estudo propõe uma abordagem para resolução de um problema real, no qual um algoritmo heurístico de busca local é construído, permitindo que diferentes cenários de tráfego sejam simulados e ocorra uma compreensão acerca de como as variáveis interagem e impactam a eficiência operacional. Assim, o trabalho visa solucionar um problema técnico, bem como contribuir para um setor vital da economia global.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do trabalho é formada por cinco seções, essas são descritas na Figura 1.

Figura 1 - Sistematização da estrutura do trabalho

Fonte: Autoria própria (2024).

Dessa maneira, na primeira seção, o estudo é contextualizado, de forma que são apresentadas a relevância do tema e a problemática central envolvida. Sendo assim, nessa seção são definidos os objetivos gerais e específicos da pesquisa, atrelados a justificativa para deliberação do tema, destacando a importância do trabalho.

A segunda seção consiste em formar o embasamento teórico do estudo, com isso são aludidos conteúdos acerca de temáticas como o mercado aeroportuário, as operações aeroportuárias, os desafios e impactos encontrados no gerenciamento de atrasos de voo, como são formadas as heurísticas de otimização, o conceito do *aircraft landing problem* e os trabalhos relacionados a temática do problema de pouso de voo.

Na terceira seção, são descritos os métodos e procedimentos empregados para consumação da pesquisa, em vista disso, nesse tópico a pesquisa é caracterizada conforme à natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos, bem como, são detalhadas as etapas realizadas para construção do estudo.

A quarta seção é elaborada para exprimir os resultados desempenhados no estudo, além de esses também serem analisados, conseqüentemente, nesse estudo, os resultados perpassam pela descrição do *aircraft landing problem*, onde é detalhado o modelo matemático do problema, pela conceituação das heurísticas de busca local, do mesmo modo que a forma como foi arquitetada a abordagem heurística da pesquisa e os resultados computacionais alcançados por meio desta.

Portanto, na quinta seção é apresentada a síntese do estudo, ou seja, essa discorre acerca das principais contribuições da pesquisa, bem como sugere estudos futuros que podem ser viabilizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico são conceituados os conteúdos e teorias que constroem o embasamento teórico da pesquisa, com o objetivo de elaborar uma base sólida para compreensão do problema. Dessa maneira, o capítulo é iniciado com uma contextualização acerca do mercado e das operações aeroportuárias, bem como, os desafios provenientes do gerenciamento de tráfego aéreo e pousos de aeronaves.

Associadamente, são retratadas as caracterizações das heurísticas de otimização e do *aircraft landing problem*, também são relatos trabalhos relacionados a problemática central, nos quais foram aplicadas abordagens heurísticas, meta-heurísticas e algoritmos exatos para deliberar soluções para as adversidades identificadas.

2.1 MERCADO AEROPORTUÁRIO

Os modais de transporte são indicados conforme com suas características operacionais, técnicas e comerciais, ou seja, se um tipo de transporte é selecionado de acordo com seus atributos comerciais, isso irá modalizar para diferentes demandas e propriedades de modo, os aspectos técnicos são variáveis com relação a condições de capacidade, velocidade e tecnologia motriz, já as conformidades operacionais são referentes ao modo no qual o translado opera, o limite de velocidade e as condições de segurança (Souza, 2022).

Uma prática logística amplamente empregada é o transporte multimodal, esse proporciona uma entrega chamada “porta a porta”, por meio da combinação de mais de um arranjo de transporte, com isso o modal aéreo em muitos casos do seu manuseio, é uma parte inerente dessa atividade, para esse arranjo é estabelecido os que vendedores sejam responsáveis por todo o translado das mercadorias, no qual os produtos são coletados no seu ponto de abastecimento e assim, entregues no local determinado conforme demanda do cliente (Shakil e Mostafa, 2018).

O transporte aéreo, segundo Muchiutti e Cancissú (2019), é indicado para conjunturas que envolvem mercadorias de peso e volume limitado, no qual a entrega deve ser feita de forma rápida e eficaz, e também os custos com armazenagem devem ser reduzidos, ou seja, esse modal é adequado para circunstâncias que possuem alto valor agregado e a primordialidade de velocidade, já que esse propicia agilidade de deslocamento, além de conforto e segurança.

Por intermédio da utilização do modal aéreo é factível realizar a prática *just in time*, em função de possibilitar a redução e eliminação de estoques, sendo viável em decorrência do capital de giro ocasionado pelo embarque contínuo, para mais, outras vantagens desse transporte são a rapidez de expedição, refletindo na maior eficiência na entrega, bem como, os

aeroportos são situados em locais estratégicos como próximos dos centros de produção industrial ou agrícola, dessa forma, as mercadorias advindas dessas produções são escoadas com eficácia (Santos et al., 2018).

Santos et al. (2018) conjuntamente contrapõem as desvantagens do modal, essas são baseadas no custeio de frete e de infraestrutura relativamente alto, quando comparados a outros modais, a capacidade de transportar carga é inferior aos modais marítimos e ferroviários, não é possível a carga de produtos a granel, como minérios, bem como, são determinadas restrições rigorosas para o transporte de artigos perigosos, como produtos inflamáveis, além de ser apresentada uma adversidade para implementar os altos custos do transporte em produtos de baixo custo unitário.

Para o Conselho de Monitoramento e Avaliação de Políticas Públicas (2020), o transporte aéreo é considerado como estratégico, devido ao fato de proporcionar um deslocamento rápido para movimentação tanto para cargas como de pessoas, além de acordo com seu porte e características, esse pode ser um agente integrador de para diversas realidades como, por exemplo, empresarias, comerciais e turísticas.

De acordo Sampaio (2023) fatores fundamentais para esse transporte são a infraestrutura e a logística, a partir disso é necessário garantir que ocorram densos níveis de investimentos para ampliação de terminais, beneficiamento das pistas de pouso e decolagem, bem como o aperfeiçoamento nas operações presentes nos processos das companhias aéreas.

O mercado aeroportuário se torna crucial, em razão da crescente competitividade empresarial, diante desse cenário as organizações buscam obter cadeias de suprimentos ideias que atendem critérios de eficiência e eficácia, para dessa forma garantir a movimentação econômica, e conseqüentemente proporcionar uma movimentação econômica global (Moura et al., 2021).

O desenvolvimento do mercado aeroportuário está associado ao crescimento econômico de uma país, sendo assim, aspectos como índices empregatícios, renda e fornecimento de linhas de crédito promovem o fortalecimento desse setor (Sampaio, 2023).

Segundo Guimarães (2023), em um país de dimensões continentais como o Brasil, o modal aéreo é primordial, por viabilizar de maneira segura e ágil, o relacionamento de diferentes culturas, o acesso para áreas distantes dos grandes centros industriais, permitindo assim que ocorra a comercialização e associação em muitas comunidades do país, esses deslocamentos agregam valor para a economia nacional.

Dessa maneira, são considerados como uma parte primordial do transporte aéreo, os aeroportos. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (2021), organização

regulamentadora das atividades áreas do Brasil, para além dos procedimentos de pouso, decolagem e movimentação de aeronaves, esses são caracterizados por dinâmicas complexas para cumprir papéis políticos, sociais e econômicos.

Por esta razão é importante diferenciar os conceitos de aeródromos e aeroportos, assim, os aeródromos possuem instalações e equipamentos para apoiar e controlar as operações aéreas, já os aeroportos são aeródromos público, nos quais as suas instalações, edificações e equipamentos são construídas, tanto para o apoio de atividades aéreas, quanto para o processamento de cargas e pessoas, bem como, esses locais possibilitam que passageiros e carregamentos sejam transferidos para modais de transporte terrestres (ANAC, 2021).

Conforme Budd e Ison (2020), os aeroportos são a ligação elementar entre céu e terra, e também exercem um papel socioeconômico, com isso, os autores citam que por ano, no mundo acontecem, em média, 34,8 milhões de voos, transportando, 3,57 bilhões de passageiros e 50 milhões de tonelada de carga. Atrelado a isso, os autores ressaltam que todas as nações do mundo possuem aeroportos de múltiplos portes, com exceção de micro estados europeus como Andorra, Liechtenstein, Monaco, San Marino e Cidade do Vaticano, além de ilhas oceânicas remotas.

Portanto, Rubio-Andrada et al. (2023), indicam que os aeroportos são um componente fundamental para a cadeia de valor do transporte aéreo, com isso essas estruturas requerem um constante processo de adaptação, para que possam atender as demandas oriundas de distintos *stakeholders* do setor.

Os aeroportos são influenciados pelo meio que estão inseridos, bem como influenciam esse meio, já que esses proporcionam desenvolvimento econômico e turístico para as regiões em que estão instalados (Forsyth et al., 2020). A complexidade dos cenários que são implantados gera a necessidade de um gerenciamento flexível e integrado (Fernandes et al., 2018).

Logo, Almeida (2018) cita que com o objetivo de alcançar o seu potencial máximo, os aeroportos devem ser elaborados a partir do cumprimento de requisitos internacionais, do mesmo modo que as infraestruturas aeroportuárias devem ser capazes de gerenciar as atividades de modernas aeronaves, e conjuntamente, coordenar o aumento de número de passageiros que ocorre de forma exponencial ao decorrer dos anos, portanto, ao passo que essa estrutura constrói condições favoráveis para o seu desenvolvimento, proporciona também, o crescimento da região em que está inserido.

De acordo com Gillen (2018), no final da década de 1970 é iniciado o movimento progressivo de desregulamentação da indústria global do transporte aéreo, por meio dessa foi

possível reduzir os custos de processamento das viagens, e diretamente, condensar os valores das passagens aéreas, assim, a demanda desse serviço cresceu exponencialmente.

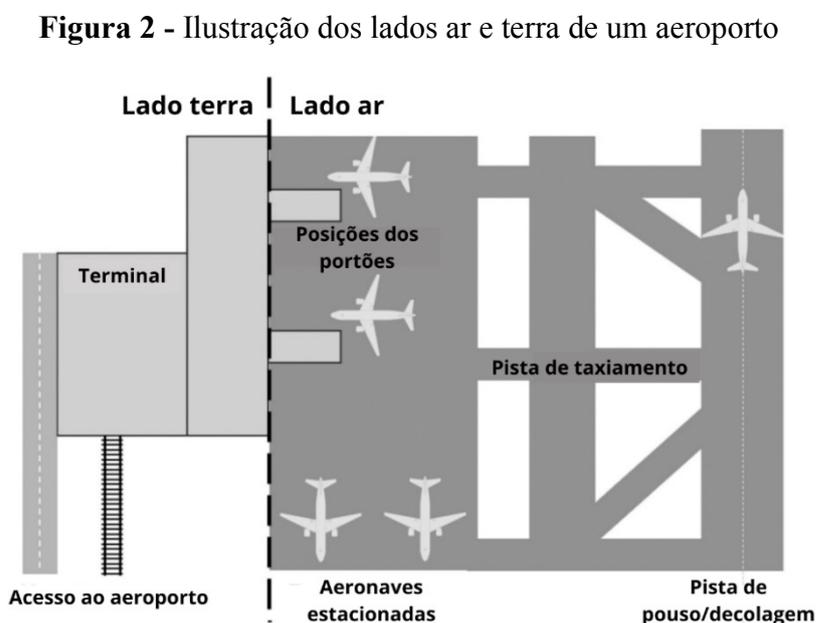
O mercado aéreo proporciona um crescimento também no setor empregatício, em virtude de fomentar uma cadeia de abastecimento que tem a demanda de múltiplos fornecedores como, por exemplo, fabricantes de aeronaves, transitários, companhias aéreas, reguladores e profissionais de tecnologia da informação, esse desenvolvimento, é refletido, igualmente, na indústria do turismo (Mayer et al., 2024).

Vale destacar que a ciência de dados é uma área de conhecimento elementar para os modais de transporte, sobretudo, o aéreo, na medida em que um fluxo de informações garante eficiência operacional para as organizações em âmbitos como controle da produção e de estoque (Almeida et al., 2019).

2.1.1 Operações aeroportuárias

As operações aeroportuárias compreendem todos os procedimentos que acontecem entre pousos e decolagens das aeronaves, dessa forma, é pertinente que ocorra o entendimento da divisão adotada para as atividades que ocorrem nos aeroportos, essa consiste na fragmentação do aeroporto nos lados terra e ar (Schmidt, 2017).

Para Ramos (2021), o lado ar é espaço onde acontecem as atribuições operacionais, ou seja, nesse espaço as aeronaves são operadas, e no lado terra, são processadas as tarefas relacionadas aos passageiros. A Figura 2 simboliza o lado ar e lado terra de acordo com Schmidt (2017).



Fonte: Adaptado de Schmidt (2017).

Dentro das operações aeroportuárias, é elementar definir as atividades logísticas que são inerentes a essas atribuições, sendo assim, Moraes (2018) define que tarefas como guiar aeronaves para pousos e decolagens, orientar o taxiamento para o estacionamento em diferentes seções do aeroporto, efetuar a gestão da manutenção de aviões, de áreas de convivência e serviços de segurança, processar o desembarque de passageiros e mercadorias internacionais, para que sejam desempenhadas as ordem de fiscalização designadas pelos serviços governamentais de inspeção, realizar o *check-in* de passageiros e bagagens, entre outras, estão atreladas à coordenação aeroportuária. Essa gestão deve ser feita tanto no lado ar como no lado terra.

Com isso, segundo Silva (2018), para o lado ar, são sucedidos procedimentos diretos nas aeronaves, ou seja, nesse lado estão implementados os sistemas de controle de tráfego aéreo, as pistas de pouso e decolagem, bem como as pistas de taxiamento, já para o lado terra, estão os itens que realizam a interligação dos passageiros e cargas entre o solo e o modal aéreo, assim estão presentes os portões de embarque/desembarque, o terminal de passageiros, os serviços de bagagem, *check-in*, banheiros, estacionamento de carros, salas *vips*, restaurantes.

Nesse sentido, o estudo de Hollaender (2019) tem como um dos objetivos mapear as práticas de gestão de operações implementadas em aeroportos, nesse sentido o autor desenvolveu taxonomias para o *landside* (lado terra) e o *airside* (lado ar).

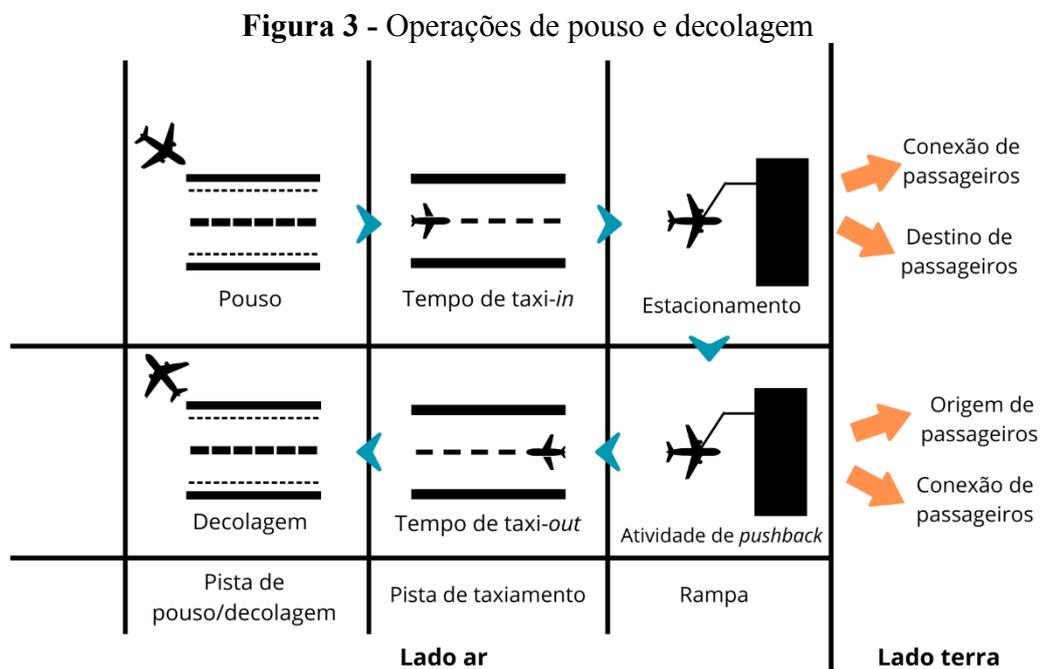
Portanto, para o lado terra são definidas as principais operações centradas nos passageiros, esse lado é setorizado em quatro partes pelo autor, sendo elas, terminal, infraestrutura, informação e segurança *landside*, para a parte do terminal são designadas as atividades de *check-in*, transporte de passageiros e retirada de bagagem, na infraestrutura são realizadas operações voltadas para o terminal como a coordenação de instalações físicas, saneamento e energia, conforto, refeições e entretenimento, as atribuições do *landside* relacionadas a informação, são voltadas para os sistemas operacionais, os painéis visuais, sistemas de áudio e vídeo, as incumbências de segurança *landside* são inspeções de bagagens, alerta antiterrorismo, inspeções de segurança e cautela contra roubo e furtos.

Com relação ao lado ar, esse é segmentado em seis partes pela taxonomia de Hollaender (2019), essa divide o *airside* em torre de controle, *turnaround*, *under the wing* (sob a asa), passageiros, proteção da aeronave e segurança *airside*, a torre de controle é responsável por aterrisagens e decolagens, movimentações de aeronaves e alocação de portões, para o *turnaround* são realizadas as operações da aeronave em solo, ou seja, são os procedimentos feitos desde a chegada na vaga operacional até a próxima decolagem, para isso é necessária a

operacionalização de equipamentos, cargas e suprimentos. As atividades de *under the wing* são associadas às operações de *turnaround*, contudo é importante detalhá-las como a execução de descarga, abastecimento e preparação da aeronave, quanto aos passageiros, esses realizam embarque e desembarque nas aeronaves, bem como o transporte entre as plataformas do aeroporto.

Por fim, as operações de segurança aérea são subdivididas em dois grupos, são eles, proteção da aeronave e segurança *airside*, a proteção da aeronave corresponde aos trabalhos voltados para manutenção e inspeções de pistas, supervisionamento da circulação e acesso à plataformas e o controle de vida selvagem, isso significa a mitigação de possíveis danos advindos da interação entre aeronaves e animais, a segurança *airside*, refere-se a realização de inspeções e processos para obter certificações técnicas de órgãos reguladores (Hollaender, 2019).

Kim et al. (2017) propõe os lados ar e terra conforme está descrito na Figura 3, a partir disso, os autores descrevem que as operações aeroportuárias são todas aquelas que acontecem entre o pouso e a decolagem de uma aeronave, dessa forma, no lado ar, quando uma aeronave realiza um pouso, ela procede o taxiamento até uma área de rampa propícia para o estacionamento do avião e também para o desembarque de passageiros. Em contrapartida, para decolagem, a aeronave recua do portão por meio do processo de *pushback*, nesse o avião é empurrado com o auxílio de um trator específico com a finalidade de levá-lo até a pista de taxiamento para que depois seja efetuada a decolagem.



Fonte: Adaptado de Kim et al. (2017).

Um elemento fundamental para as operações aeroportuárias são as torres de controle, essas estão presentes nos aeródromos com a finalidade de proporcionar serviços de controle para o aeródromo, ou seja, essas estruturas viabilizam que as fases de manobra, decolagem, pouso e sobrevoos de aeródromo aconteçam de maneira segura, sem que ocorram colisões entre aeronaves, obstáculos e veículos terrestres (Freitas, 2016).

A autora também cita que nas torres de controle estão implementados os complexos e tecnológicos, sistemas de controle de tráfego aéreo, esses atuam em cenários dinâmicos marcados por incertezas e riscos a fim de evitar colisões entre aeronaves, bem como, precaver as colisões entre aeronaves na área de manobra, preservar a ordenação do tráfego aéreo, propiciar informações para que os voos sejam seguros e eficazes e comunicar os órgãos governamentais pertinentes quando as aeronaves requerem busca e salvamento.

Os sistemas implementados nas torres de controle são operados por controladores de tráfego aéreo, além de manusear o sistema, esses também buscam minimizar o atraso de chegadas e partidas de voos e otimizar o tempo de espaçamento entre as aeronaves antes da aterrissagem (Samà et al., 2019).

2.2 GERENCIAMENTO DE ATRASOS NO SETOR AÉREO: DESAFIOS E IMPACTOS

De acordo com a Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO), o setor de aviação tem crescido de maneira exponencial, de forma que a organização conjectura que até 2040, 10 milhões de passageiros irão passar por aeroportos ao redor do mundo (ICAO, 2018). Contudo, apesar do modal aéreo apresentar rapidez e eficiência, esse defronta dificuldades de gerenciar suas operações, com isso atrasos nas atividades das empresas aéreas é um cenário cada vez mais comum. (Bendinelli e Oliveira, 2024).

A indústria da aviação é substancial para o desenvolvimento social e econômico de muitas nações, já que esse setor pode participar de atividades de sistemas turísticos, como também do transporte de cargas de medicamentos, alimentos e bens globalmente essenciais, contudo essa esfera defronta contrariedades para responder a condições de volatilidade, como por exemplo, crises econômicas, desastres naturais, instabilidade política e pandemias (Dube, Nhamo e Chikodzi, 2021).

O planejamento de voo é apontado como um dos principais desafios da indústria aérea, dado que esse cenário é marcado por condições de incerteza, com isso, esse mercado é guiado para uma conjuntura de construção de atrasos advindos de diferentes motivações, como mudanças climáticas, demandas sazonais, políticas estabelecidas por companhias aéreas,

transtornos técnicos e mecânicos, tanto nas aeronaves, como nas instalações dos aeroportos, atrasos propagados por voos anteriores (Borse et al., 2020).

Conjuntamente, os autores apontam que as adversidades são refletidas, e acarretando em problemas de programação e operações para as companhias aéreas, os aeroportos, e sobretudo, o desconforto e descontentamento dos usuários finais.

Além disso, conforme Borse et al. (2020), as companhias aéreas, os aeroportos e os espaços aéreos delimitados em rotas, são considerados entidades independentes, contudo, trabalham de maneira sincronizada, com isso, adversidades em um dos setores são retratadas efetivamente em todos eles.

Portanto, os atrasos são estabelecidos por Zhixing, Shan e Songchen (2021), como a anormalidade que ocorre quando a aeronave não decola ou pousa no horário estabelecido, esse desequilíbrio pode ser disseminado para os voos que estão sequenciado em um cenário de regularidade, desse modo, os atrasos procedem diante de uma rede complexa caracterizada por dinâmica de rede, falha em cascata ou processo epidêmico.

Para Carvalho et al. (2020), na ciência de dados, os atrasos podem ser compreendidos de seis panoramas divergentes, são eles, a chegada, a partida, a propagação de atrasos, a companhia aérea, o aeroporto e o sistema aéreo, de forma que as fontes para obtenção dos percentuais desses atrasos, são advindas das companhias aéreas, dos aeroportos, de agências públicas, de bancos de dados meteorológicos e de iniciativas de dados abertos.

Dentre as diferentes perspectivas dos atrasos, fatores operacionais podem afetar essas de forma simultânea, ou seja, elementos como atividades do aeroporto, tripulação, processamento de bagagem, taxiamento e estacionamento de aeronaves, serviço de balcão e atraso de passageiros intercedem nos seis panoramas de atrasos (Carvalho et al., 2020). Os atrasos também podem ocorrer em virtude de situações clima extremas como nevascas e queimadas, falhas na gestão de operações, condições indevidas para os controladores de tráfego aéreo (Chen e Lin, 2021).

Yu et al. (2019) agrupam os atrasos entre fatores de nível macro e princípios internos das operações que podem conduzir o processamento para o atraso, à vista disso, os fatores macros são o clima, efeitos sazonais, propagação de atraso e controles de tráfego aéreo, e os fatores internos da operação referem-se ao atraso de voo anterior, as propriedades da companhia aérea, ao número de passageiros para um voo, a capacidade da aeronave, a forma de embarque, o grau de aglomeração do aeroporto, bem como o terminal do voo, o intervalo entre o horário de *check-in* e o horário programado de partida, o horário de fechamento da porta do porão de carga e o tempo de prontidão dos ônibus ou ponte de embarque.

Uma importante circunstância para ser ponderada, é a conjuntura no qual as empresas aéreas toleram, de maneira proposital, atrasos de quinze minutos, independentemente de o voo de pré-segmento ser pontual ou atrasado, visto que essa é uma política gerencial permitida, entretanto essa idiosincrasia pode resultar em contrariedades para o estabelecimento do controle e gerenciamento da propagação de atrasos de voos (Wang et al., 2020).

Dado que o tráfego aéreo atua em correspondência a uma rede complexada e interligada, os atrasos podem estar submetidos a condições de propagação (Chen et al., 2024).

Para Kim e Park (2024), isto significa que os atrasos podem ser categorizados em atrasos raiz, propagado e gerado, desse modo, altos valores de atrasos agrupados como raiz ou recém-formados apontam atribuições pertinentes as operações das companhias aéreas e a capacidade das instalações aeroportuárias envolvidas, essas são referentes aos processos de preparação de decolagem e pouso. Com relação aos altos índices para atrasos especificados como propagados, esses demonstram que o aeroporto/rota está sendo veementemente afetado por atrasos que foram sucedidos em aeroportos/rotas predecessoras, e os ressaltados níveis para atrasos identificados como gerados em um aeroporto/rota denota que os atrasos raiz procedentes daquele aeroporto/rota são refletidos de maneira significativa em outros aeroportos/rotas.

Os custos decorrentes de atraso de voos, conforme estatísticas ocasionam perdas econômicas de bilhões de dólares em todo mundo, esses desembolsos perpassam por demandas operacionais para às companhias aéreas, além de perdas canalizadas na fidelidade de clientes e imagem da marca, assim os custos também são enfrentados por passageiros, esses podem desempossar tempo, bem-estar e sobretaxas requeridas mediante condições de atraso (Liu et al., 2019; Song et al., 2024).

No estudo de Tan et al. (2021), foi ponderada a situação de que caso seja sucedido um atraso de dez minutos, no pouso anterior a uma hora da próxima decolagem, esse atraso vai ser revertido em sete minutos e meio de atraso na decolagem seguinte.

Na conjuntura global, congruente a plataforma FlightStats, em 2023, a média de atraso em todo mundo é observada entre 15% a 20% nos voos realizados diariamente, contudo esses dados também oscilem em diferentes regiões e épocas do ano (FlightStats, 2023).

No Brasil, conforme Yamakami (2024) relata, a organização AirHelp, que opera para resguardar direitos de passageiros constatou que até 2024, 416 mil passageiros foram afetados por atrasos acima de duas horas, expressando um estado de alerta para as atividades do setor no país, já que 1 em cada 120 passageiros tiveram suas experiências conturbados por tais situações.

De acordo com um relatório publicado pela Eurocontrol (2023), o tempo médio de atrasado por voo no continente europeu é avaliado em cerca 17,3 minutos, esse fator é

contraproducente, tanto para as companhias aéreas que perdem a confiabilidade em suas operações, quanto para os passageiros que tem o planejamento de seus compromissos alterado (Wang e Wang, 2019).

Para Song, Guo e Zhuang (2020), apesar de haver diferenças geográficas e operacionais entre as companhias aéreas, os passageiros consideram fatores semelhantes em diferentes áreas, estes indícios estão direcionados para qualidade do serviço, o que pode diferenciar as exigências dos clientes é a maneira como o serviço é realizado, ou seja, o foco de usuários que encaram atrasos é diferente daqueles que não sofreram. Sendo assim, para os voos que pousam e decolam no horário, coeficientes como assento, comida e o serviço de bordo são indicadores de qualidade para os consumidores, já quando os atrasos são sucedidos, elementos como a estrutura aeroporto, o serviço de embarque e a quantidade de tempo do atraso concernem para a impressão dos passageiros.

Consequentemente, segundo Jiang e Ren (2019), a experiência do cliente acerca do atraso é variada conforme o tamanho do atraso, o tempo de resposta das companhias aéreas para fornecer informações do atraso de voo, bem como o nível de veracidade e confiança dos passageiros nessas informações.

Os usuários também ponderam a reputação da companhia aérea, programas de fidelidade e padrões de segurança, dessa maneira é necessário que as companhias aéreas e formuladores de políticas aéreas permeiem um equilíbrio para alcançar a satisfação do cliente e a eficiência operacional (Xie et al., 2024).

Com isso, como o mercado é marcado por uma conjuntura na qual os atrasos crescem de maneira significativa, o gerenciamento de atrasos de voos é uma relevante temática estudado dentro do mercado aéreo, visto que a compreensão acerca dessa concede ganhos para toda a cadeia envolvida, desde a proteção do consumidor até a eficiência das operações efetuadas pelos aeroportos e companhia aéreas (Kim e Park, 2024).

Para alcançar a mitigação dos riscos estabelecidos pelos atrasos de voos é fundamental que sejam previstos e identificados os atrasos e seus devidos preditores, simultaneamente é preciso que ocorra o investimento conjunto das companhias aéreas e dos aeroportos, em tecnologias para as aeronaves, estratégias de marketing e tecnologias de comunicação e informação (Truong, 2021; Raihan et al., 2024).

Paralelamente, é oportuno que sejam alterados os sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo, dado que esses são baseados em parâmetros de distância, para que ocorram otimizações é ideal que esses sejam modificados para padrões de tempo, e dessa maneira seja alcançada uma operação eficiente (Kim e Park, 2024).

Sistemas de monitoramento em tempo real e previsão com alto nível de precisão são ferramentas que auxiliam no processo de otimização das atividades de autoridades da aviação, dado que essas mitigam efetivamente os atrasos, as perdas econômicas e elevam as conjunções de satisfação dos passageiros (Thiagarajan et al., 2017).

2.3 HEURÍSTICAS DE OTIMIZAÇÃO

De acordo com Slack et al. (2023) e Vélez-Gallego et al. (2016), o emprego de recursos em metodologias de otimização resultam na convalescença da programação de inúmeros processos produtivos, sendo assim, essas estruturas podem proporcionar redução de tempo e custos na produção de bens e serviços.

No campo da pesquisa operacional, são empregados métodos científicos para amparar processos de tomada de decisão que apresentam diligências de recursos limitados ou escassos, dessa maneira são desenvolvidos métodos exatos e heurísticos para obter a otimização de inúmeras problemáticas (Vianna, 2022).

Nesse contexto, os métodos ou algoritmos heurísticos são incrementados em virtude de serem impostas contrariedades, para que sejam determinadas soluções exatas para disfunções de natureza combinatória de alta complexidade e a demanda por um significativo custo operacional (Castro et al., 2023; Conserva e Silva, 2024).

Dessa maneira, para Goldberg, Goldberg e Luna (2016), as heurísticas são retratadas como um método de caráter aproximativo que busca solucionar problemas de ordem *NP-Hard*, à vista disso, por meio da metodologia é possível incrementar boas soluções que possam garantir viabilidade ou otimalidade, dado o fato que sejam consideradas as condições de averiguação por uma solução viável correlata a situação ótima, em um tempo e desempenho computacional menor e regular.

Segundo Pinedo (2022), os problemas classificados como *NP-Hard* são aqueles que não são passíveis de constituir algoritmos eficientes de solução viável em tempo polinomial. A complexidade dessas objeções pode ser sucedida de diversas maneiras, isto significa que podem ocorrer em virtude de uma explosão combinatória conforme o problema é escalonado, ou também, em decorrência da natureza laboriosa do modelo matemático implícito, ou seja, podem compreender variáveis inteiras ou discretas, funções objetivo não lineares ou não diferenciáveis, restrições não lineares e regiões factíveis não convexas (Plazas, 2023).

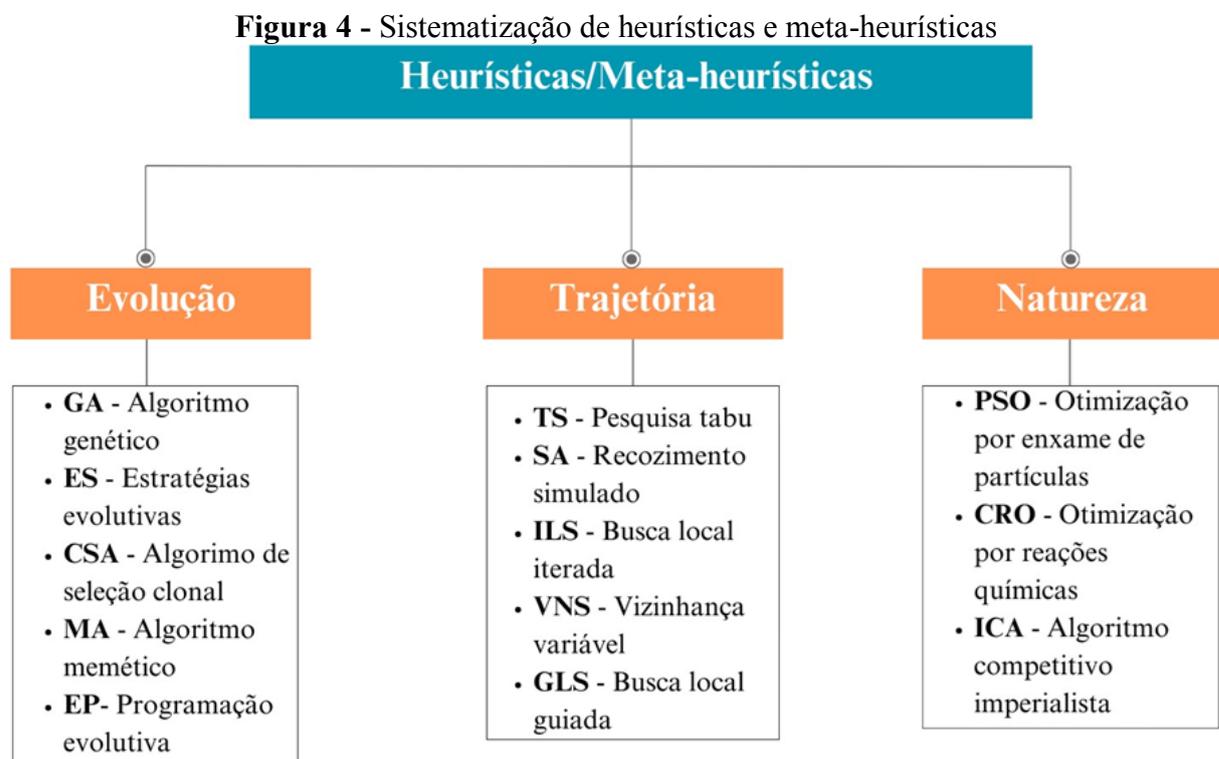
Para Barbosa (2024), as heurísticas de otimização são categorizadas em duas seções, as heurísticas construtivas e as heurísticas de refinamento. O autor delinea que as heurísticas construtivas são aquelas que tem como objetivo gerar uma solução inicial viável, essas são

construídas componente por componente, sendo assim, a cada iteração, uma nova decisão é deliberada e itens selecionados são incorporados à solução do problema proposto.

Sendo assim, as heurísticas de refinamento estabelecem um processo de busca a partir de uma solução existente, no qual nas iterações são averiguadas soluções que possam substituir a solução atual por uma que entregue critérios melhores, ou seja, esses algoritmos são habilitados para modificar elementos de uma solução para adquirir soluções com atributos semelhantes, as alterações são realizadas nas chamadas vizinhanças (Burke e Kendall, 2014; Gendreau e Potvin; 2019; De Carvalho André, Da Silva e Silva, 2024).

Barbosa (2024) ainda aponta que as heurísticas são amplamente empregadas, sobretudo na construção de meta-heurísticas. Conforme Li et al. (2024), as meta-heurísticas utilizam de procedimentos computacionais de busca local, por exemplo, para orientar heurísticas subordinadas, e com isso, essas são consideradas métodos heurísticos primorosos, em que são feitas escolhas aleatórias associadas a cognições prévias, para assim direcionar e realizar de forma estratégica as buscas em regiões avaliadas como auspiciosas.

Consoante a Santos (2023), a lógica intrínseca as heurísticas e meta-heurísticas é conceituada em três pilares, sendo assim, essas podem ser de caráter evolutivo, de trajetória e baseadas em elementos presentes na natureza. A Figura 4 descreve a sistematização de heurísticas e meta-heurísticas desenvolvida por Harifi et al. (2020).



Fonte: Adaptado de Harifi et al. (2020).

As heurísticas e meta-heurísticas fundamentadas em trajetória empregam uma única solução que é alterada conforme o encaminhamento do algoritmo, assim resultados eminentes são decifrados nas adequadas vizinhanças (Massambani, 2024). Desse modo, os métodos evolutivos são aqueles que replicam os padrões encontrados na seleção natural e evolução biológica, isso significa que as populações do problema buscam estruturar soluções com o intuito de distinguir quais são as entidades capazes de progredir diante de adversidades encontradas, já para os sistemas baseados em elementos da natureza, esses utilizam os comportamentos de coletividade presente em enxames, grupos biológicos, físicos e químicos, como por exemplo, seres humanos e plantas (Harifi et al., 2020).

Para Plazas (2023), são circunstâncias passíveis da utilização de heurísticas de otimização quando são objetivados problemas que não possuem método exato de resolução, quando uma solução ótima é proposta, porém não é viável da perspectiva prática, em conjunturas que são difundidos dados com alto grau de incerteza, como por exemplo, problemas de planejamento, do mesmo modo que quando restrições de tempo de processamento e armazenamento de dados são determinadas, e também, quando procura-se diligenciar uma solução inicial adequada para que posteriormente possam ser aplicados métodos de otimização mais robustos.

Com isso, segundo Marodin e Freitas (2020), as heurísticas e meta-heurísticas tem como propósito condensar de maneira significativa um espaço amostral, por meio da redução de soluções desfavoráveis, sendo essas aquelas que apresentam alto custo e baixo nível de eficiência.

A compreensão acerca do princípio dos problemas de otimização combinatória é elementar para o entendimento da formação das heurísticas, dessarte Tarnowski (2021) delimita que as objeções dessa ordem possuem um par (S, g) , sendo S um conjunto de soluções viáveis que atendem o agrupamento de restrições do modelo referido, e g é a função que determina um número real para as soluções abstraídas em S , diante disso, a finalidade das heurísticas é deslindar uma solução s , dentro de S , para minimizar o valor revertido por g .

A partir disso o autor também estabelece o conceito das heurísticas de busca local, dessa forma essas têm como finalidade minimizar a função objetivo g por meio de passos estabelecidos para a substituição de uma solução x por uma y , essa modificação é efetuada pelo movimento de troca entre componentes de uma vizinhança $N(s)$.

Por conseguinte, esse artifício tem como fundação uma solução arbitrária, e por interferência de métodos de construção encontra um mínimo local, desse modo entre os extremos do método existem diferentes meios para encontrar uma próxima solução aprimorada,

esses definem o nível de complexidade da heurística *local search*, bem como, o tamanho da vizinhança e o tempo preciso para encontrar uma próxima solução também instituem o hermetismo da heurística (Tarnowski, 2021).

Posto isso, segundo Santos (2023), apesar de as abordagens heurísticas não requerem numerosos requisitos para construção e implementação, é necessário um conhecimento no que concerne as características, restrições e objetivos do problema estudado.

2.4 AIRCRAFT LANDING PROBLEM

O *aircraft landing problem* é dado a partir da demanda de designar os tempos e pistas de pouso com o objetivo de que cada uma das aeronaves, de acordo com a sua classificação, realize aterrissagens seguras e eficientes. As designações precisam ser feitas com o intuito de deliberar uma sequência de pousos, na qual as divergências entre o horário alvo e o horário real de pouso sejam minimizadas, reduzindo assim, as penalidades concedidas para esse tipo de problema, ou seja, todos os voos devem estar dentro da janela temporal, cumprindo os requisitos de separação (Briskorn e Stolletz, 2013).

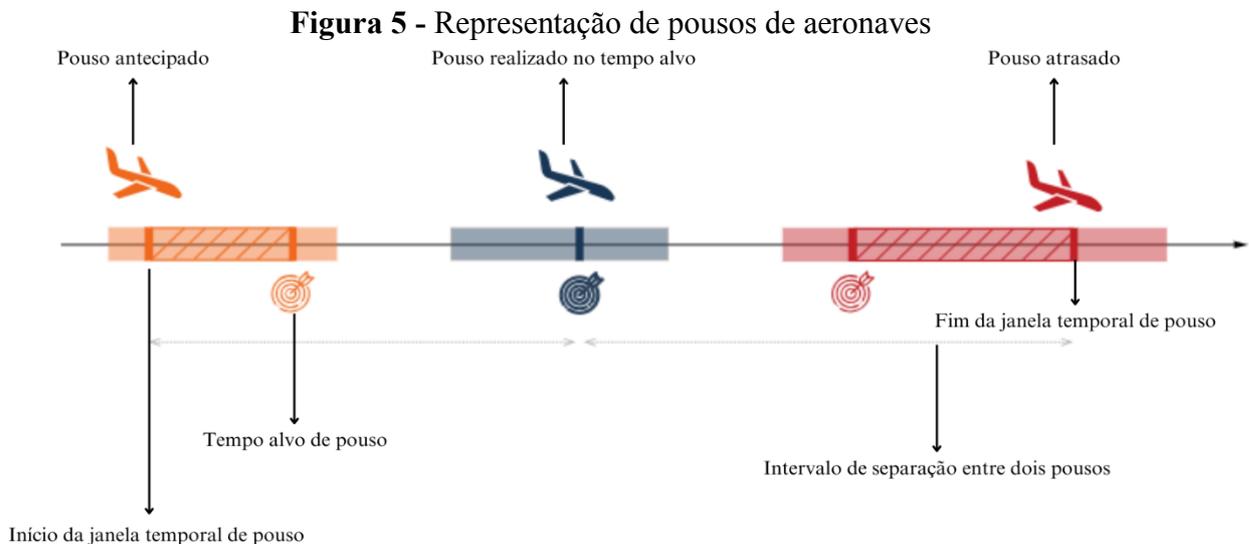
Para Sternberg et al. (2017), o atraso de pouso de voo é estudado diante de diferentes objetivos de pesquisa, assim esses podem ser analisados a partir de análise estatística, modelos probabilísticos, representação de rede, pesquisa operacional e aprendizado de máquina.

Briskorn e Stolletz (2013), ainda reiteram que o fator que diferencia as aeronaves são suas classes de pesos, já que de acordo com esse fator, o vórtice gerado no ar é mais severo ou ameno. Dessa forma, o tempo que deve ser considerado entre o pouso de uma aeronave e outra são divergentes, sendo necessário determinar uma janela de tempo maior para que ocorram pousos de pequenas aeronaves após a aterrissagem de um voo de grande porte, com o intuito amenizar as turbulências, além de que é preciso estabelecer uma distância segura entre essas aeronaves.

Para o ALP são estudadas restrições lineares e quadráticas, ou seja, espaços de tempo e a distância de separação entre duas aeronaves subsequentes (Faye, 2015). Dentro dos espaços temporais, estão os horários de pouso alvo, sendo este estabelecido preliminarmente.

A Figura 5 demonstra as circunstâncias presentes no *aircraft landing problem* de acordo com Sandrine (2021). A primeira situação, em laranja, representa o pouso antecipado, já a última, em vermelho, simboliza o pouso que ocorreu fora da janela de tempo proposta. Por fim, a azul, indica que o pouso ocorreu no horário alvo. Desse modo, o ALP busca minimizar

as penalizações totais, sobretudo de custos, que são concedidas para os voos atrasados ou antecipados.



Fonte: Adaptado de Sandrine (2021).

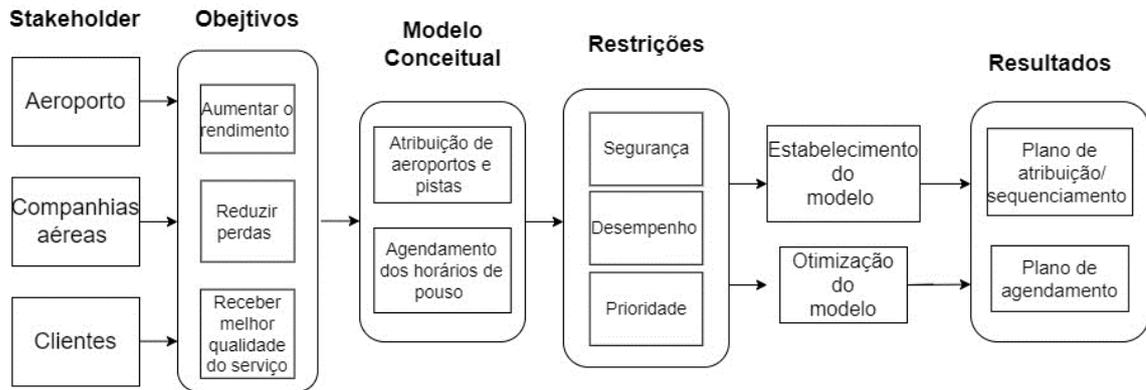
A forma como antecipações e atrasos interferem nos voos é divergente, a antecipação gera custos associados ao desperdício de combustível ao utilizar uma velocidade maior que a estabelecida, já os atrasos levam a possível perda de voos que possuem conexão, custos relacionados a taxas extras de manutenção e carregamento de passageiros, reprogramação da equipe em terra, entre outras penalidades (Vadlamani e Hosseini, 2014).

Conforme Pamplona et al. (2021), o método tradicional proposto pelo gerenciamento de tráfego aéreo da grande maioria dos aeroportos é o *first come, first served* (FCFS), esse consiste em organizar uma fila de acordo com a chegada das aeronaves nas imediações do local de pouso, com isso o monitoramento é realizado por vetoração radar e pelos procedimentos padrão de chegada (STAR - *standard terminal arrival*), para realizar a divisão das aeronaves. De acordo a forma como o método é empregado, são estabelecidos mecanismos de espera e redução de velocidade, tendo resultado o aumento do tempo de voo, e conseqüentemente o encarecimento dos custos associados a esta atividade.

Zipeng e Yanyang (2018), definem que para implementação de modelos de otimização no ALP, é fundamental que seja garantida a ponderação das restrições e das necessidades específicas dos diferentes *stakeholders*. Posto isto, os autores mapearam o fluxo metodológico desse problema, considerando as partes interessadas, os objetivos a serem alcançados, as restrições, a estruturação do modelo conceitual para que sejam empregadas as otimizações e

dessa forma, obter os resultados de sequenciamentos e agendamentos melhorados, a Figura 6 ilustra tal mapeamento.

Figura 6 - Mapeamento do *aircraft landing problem*



Fonte: Adaptado de Zipeng e Yanyang (2018).

Dessa forma, Briskorn e Stolletz (2013), descrevem o problema de pouso de voo como um modelo de programação da produção, obedecendo a mesma lógica de outros arquétipos de problemáticas, como por exemplo, o processamento de produtos em máquinas, sendo as pistas equivalentes às máquinas e as aeronaves às atividades realizadas.

Dessa forma, o *aircraft landing problem* tem o objetivo de deliberar um sequenciamento de pousos que suceda no melhor processamento das aeronaves que estão dentro do planejamento de aterrissagens dos aeroportos, resultando na utilização mais adequada das pistas e mitigação de atrasos. Além disso, o ALP considera inúmeras restrições operacionais, sendo considerado um problema *NP-Hard*, onde se utiliza de heurísticas e metaheurísticas para solucioná-lo (Pamplona et al., 2021).

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Dado o aprofundamento de estudos sobre heurísticas de otimização ao longo dos anos, o quantitativo de estudos sobre abordagens de otimização para o *aircraft landing problem* aumentaram expressivamente.

Com isso, Bencheikh, Boukachour e Alaoui (2011) exploraram o problema de pouso de aeronaves para dois casos, analisando a aplicação da heurística em uma única pista de pouso e para múltiplas pistas de pouso, a finalidade dessa aplicação é estabelecer agendamento de pouso de aeronaves mais eficiente, utilizando o *ant colony algorithm* (algoritmo de colônia de formigas). A partir do seu desenvolvimento, foi possível conceber soluções ótimas em 80% do

número total de instâncias, sendo considerado um bom resultado, com desvio médio de 5% das soluções ótimas para 20% das instâncias restantes.

Dessa forma, Salehipour, Modarres e Naeni (2013), construíram um algoritmo meta-heurístico fundamentado no algoritmo de *simulated annealing* (recozimento simulado), implementando uma heurística de construção e uma meta-heurística de melhoria para resultar em soluções próximas ao ótimo, porém, com menor tempo de processamento computacional para o problema de pouso de voo, buscando minimizar o desvio total do tempo alvo. A abordagem alcançou soluções de boa qualidade, resolvendo problemas com até 500 aeronaves.

Xiao-Rong, Xing-jie e Zhao (2014) utilizaram a heurística *genetic algorithm* para solução do *aircraft landing scheduling* (agendamento de pousos de aeronaves) e do *aircraft landing problem*. Para essa execução foi utilizado o cálculo da entropia da informação de localização do gene, nesse cenário o algoritmo atinge de forma mais rápida a solução ótima, sendo essa uma programação de pouso de aeronaves considerada eficiência. Além disso, os autores realizam a comparação com o algoritmo genético tradicional, e observaram que o algoritmo desenvolvido possui convergência rápida e soluções de alta qualidade.

Para o ALP, Jassam et al. (2020), empregaram uma abordagem combinatória da heurística *simulated annealing* (recozimento simulado) com o método exato *exact timing*, essa foi testada em treze instâncias, e o método apresentou resultados computacionais satisfatórios.

Já Liu (2011), opera um algoritmo metaheurístico evolucionário baseado em população, o *genetic local search*, no qual são estabelecidas a dinâmica de seleção e operação de cruzamento para um único ponto no ordenamento do algoritmo, este alcançou resultados superiores, quando comparado a outras meta-heurísticas nos fatores de a obtenção da função objetivo e o tempo computacional.

Nesse sentido, Briskorn e Stolletz (2013), estabeleceu uma otimização para o ALP, empregando uma heurística híbrida fundamentada em *particle swarm optimization* e *local search* em uma estrutura de horizonte rolante, a titulação da abordagem foi abreviada como RH-HPSO-LS, essa tinha como objetivo constituir um cronograma para o sequenciamento de pousos ideais. Os resultados computacionais foram satisfatórios para instâncias de benchmark de até 500 aeronaves e 5 pistas de aterrissagem, no entanto, no estudo foi ressaltado que faz necessário aprimorar este algoritmo para que as soluções sejam alcançadas um espaço de tempo mais curto.

Ng et al. (2016), propõem uma *constructive heuristic* para um determinado algoritmo ABC que tem como objetivo basear a tomada de decisão do controlador da torre área em situações que o tráfego se encontra em situação de congestionamento, foram empregados

artificial *bee colony algorithms*. Como resultado, essa abordagem obteve uma performance promissora, no qual foram realizadas buscas em 6,1 segundos para o ALP. Além disso, o algoritmo proposto é um algoritmo modificado, esse superou os resultados dos algoritmos MIP e o ABC original, mesmo sendo executado com requisitos computacionais limitados.

3 METODOLOGIA

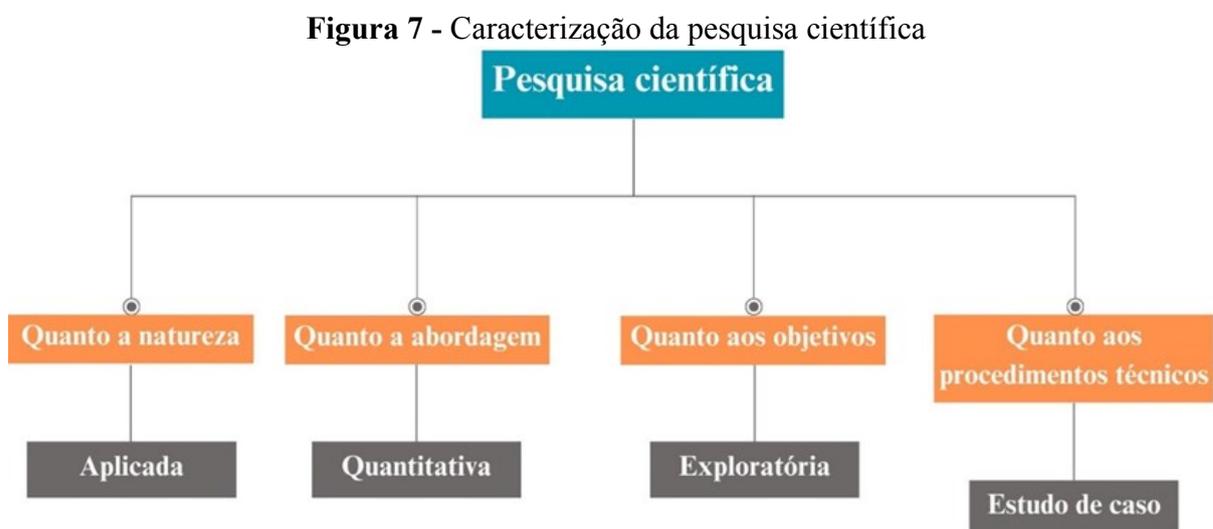
Nesse item, são relatados os métodos e processos que foram utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, ou seja, são detalhadas as etapas presentes no estudo, desde a coleta de dados até a implementação da abordagem heurística.

Posto isso, nesse tópico, também se elaborou a caracterização da pesquisa, de acordo com padrões para atingir o objetivo geral do estudo, sendo esse, propor e testar uma heurística de busca local para o problema de pouso de aeronaves.

3.1 CARATERIZAÇÃO DA PESQUISA

Para a realizar a colaboração com o conhecimento é substancial que sejam compreendidos conceitos de base da pesquisa científica, posto isso, essa pode ser determinada como processo sistemático de investigação para que possam ser desenvolvidos conhecimentos acerca de fenômenos e problemáticas, são características dessa exploração, a presença de base empírica, reprodutibilidade e a objetividade (Lakatos e Marconi, 2021; Gil, 2019).

Nesse sentido, de acordo com Almeida (2021), as pesquisas científicas são caracterizadas com a finalidade de alcançar uma concepção assertiva e acurada, em vista disso as pesquisas podem ser entendidas conforme vertentes como a natureza e objetivo do estudo, a abordagem do problema e os procedimentos técnicos adotados. A Figura 7 retrata quais foram propriedades aplicadas na pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2024).

Dessa forma, quanto a natureza, essa pesquisa é descrita como aplicada, já que essa busca solucionar uma problemática de ordem prática por intermédio de conhecimentos teóricos já versados (Godoy et al., 2023), bem como o estudo apresenta resultados diretos voltados para otimização do sequenciamento de pouso de voos por meio da construção e implementação de uma heurística de busca local.

O trabalho quanto a abordagem assume um comportamento quantitativo, já que em conformidade com Sampaio (2022), as pesquisas quantitativas acontecem entre a observação empírica e a expressão matemática, sendo assim, essas são indicadas por fornecer objetividade na coleta de dados e na sua respectiva análise, essa que ocorre por meio da utilização de métodos estatísticos para explorar fenômenos, avaliar hipóteses e correlacionar variáveis. O estudo utiliza dessa caracterização em virtude de realizar a coleta de dados numéricos para a aplicabilidade do procedimento heurístico ser viabilizada, e além disso ponderar os resultados com ferramentas estatísticas.

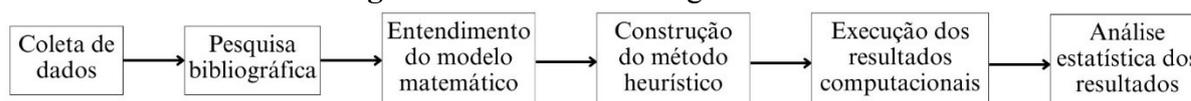
Para Nascimento (2016), as pesquisas de caráter exploratório quanto aos objetivos, são delineadas como estudos que tem como base pragmática proporcionar o domínio do pesquisador sobre o seu objeto de estudo, para que sejam resultados a construção de hipóteses ou elucidação acerca de determinadas temáticas.

Desse modo, o trabalho pode ser delimitado nessa classificação, dado que foi necessário a construção de um embasamento teórico no que se refere ao mercado aeroportuário, as operações aéreas, a estruturação de heurísticas de otimização e ao problema de pouso de voo, mediante a essa fundamentação foi possível constituir a elaboração do trabalho.

Quanto aos procedimentos técnicos, o trabalho é conceituado como estudo de caso, dado que esse é indicado como um método para proceder uma averiguação intensiva e sistemática de conjunturas, comunidades, instituição ou indivíduo, tendo como intuito principal estabelecer entendimento sobre um fenômeno e construir base teórica para circunstâncias semelhantes, nessa sistemática também pode-se compor uma dinâmica que permite que os resultados encontrados sejam relacionados com teorias e dados de outros métodos de pesquisa (Guerra, 2023).

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

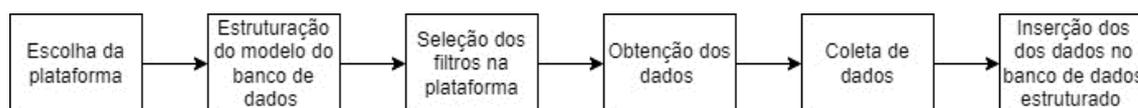
Para elaboração da pesquisa foram necessárias seis etapas elementares, sendo assim, o fluxo metodológico da Figura 8 representa a estruturação realizada no trabalho.

Figura 8 - Fluxo metodológico do estudo

Fonte: Autoria própria (2024).

Na primeira etapa do estudo foi realizada a coleta de dados, essa foi elaborada a partir de dados disponibilizados na plataforma *FlightStats*, na qual foram filtradas chegadas e partidas do Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes - Gilberto Freyre e Governador Eduardo Campos.

Com o intuito de facilitar a coleta de dados foi estruturado um banco de dados no *software Microsoft Excel*, nesse foram inseridos todos os voos que ocorreram nos dias 05, 07, 09 11, 13 de outubro de 2022, nesse quadro foram introduzidos a origem, o destino, a companhia aérea do voo, o código de voo, qual a aeronave utilizada, os horários de chegadas e partidas aos portões dos terminais, e horários reais e previstos para os pousos e decolagens. A figura 9 indica de maneira detalhada como ocorreu o processo de construção da coleta de dados.

Figura 9 - Processo de construção da coleta de dados

Fonte: Autoria própria (2023).

Para o estabelecimento da fundamentação teórica, foi elaborada uma pesquisa bibliográfica que teve elementos como, periódicos nacionais e internacionais, base de artigos científicos, livros, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses para compor as referências das temáticas significativas para o estudo, essas são, os aspectos atrelados ao mercado aeroportuário e as suas operações, os desafios e impactos detectados no gerenciamento de atraso de voos, a constituição de heurísticas de otimização, do mesmo modo que como o problema de pouso de voo é instituído e os trabalhos relacionados a essa problemática.

No que concerne a terceira etapa do trabalho, essa foi elementar para serem compreendidas qual é a função objetivo do *aircraft landing problem*, bem como quais são as variáveis de decisão e as restrições que este está sujeito. A partir dessa assimilação é possível entender qual a dinâmica proposta do objeto de estudo do trabalho, assim a construção do método heurístico é viabilizada.

Dessa maneira, a quarta etapa do trabalho foi voltada para estruturação do mecanismo heurístico, esse procura mitigar os atrasos presentes entre um sequenciamento de pousos. Para formulação e implementação do mecanismo foi adotada a linguagem de programação *Visual Basic for Applications* (VBA) e o emprego de planilhas eletrônicas do *software Microsoft Excel*.

A lógica utilizada no desenvolvimento da heurística foi preliminarmente criar uma solução inicial aleatória, em que essa foi ponderada por critérios de avaliação estabelecidos na função objetivo, ou seja, é calculada a divergência estabelecida na solução. Com isso, são executadas iterações para trocar na vizinhança do sequenciamento as posições dos voos, e assim encontrar novas soluções, essa mobilidade é nomeada busca local. São inseridos também técnicas de perturbação para aprimorar os sequenciamentos propostos.

Os resultados computacionais foram executados em uma máquina Intel(R) Core(TM) i3-10110UCPU com 2.10GHz e 4 GB RAM que tem o sistema operacional *Windows 10*.

Para executar a análise estatística dos resultados, foram feitas execuções da heurística em três instâncias, buscando encontrar a divergência total dos sequenciamentos, e assim foi possível calcular parâmetros como a média e o desvio padrão estabelecido entre o resultado das execuções. Além disso, utilizou-se o *software Minitab* para gerara gráficos de séries temporais com os melhores das melhores divergências resultadas das execuções do algoritmo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são retratados os resultados compreendidos a partir da pesquisa, dessa forma, são descritas quais são as características do *aircraft landing problem*, o modelo matemático da problemática, como são formadas as heurísticas de busca local, o modo como ocorreu a formação da abordagem heurística construída, bem como, quais foram os resultados computacionais obtidos a partir dessa.

4.1 DESCRIÇÃO DO *AIRCRAFT LANDING PROBLEM*

De acordo com Zhang et al. (2020), o ALP busca apontar o sequenciamento e o tempo de pouso de aeronaves, otimizando objetivos predeterminados, do mesmo modo dos problemas de processamento de produção que procuram mitigar os atrasos presentes na linha produtiva. Tendo em vista isso, os autores fazem um comparativo entre os cenários do problema de pouso de aeronave e do problema de processamento de pedidos de produção, de forma que os pedidos de produção são as aeronaves, já as máquinas são as pistas, os horários do primeiro e último pouso são a data de liberação da ordem de serviço e o prazo final para a entrega do pedido, respectivamente, assim como, a data prevista para entrega do pedido é o tempo alvo de pouso no ALP, além disso, o tempo de setup de um processo produtivo é o tempo de separação de vórtice dos voos.

Dessa maneira, Zhang et al. (2020) definem o modelo matemático para o ALP, a partir da programação linear inteira mista, o Quadro 1 apresenta as equações do modelo matemático do problema.

Quadro 1 - Modelo matemático do *aircraft landing problem*

Equação	Índice da equação
$\min \sum_{i=1}^n (g_i E_j + h_i T_j)$	(1)
$s. t. r_j \leq C_j \leq d_j \forall j \in J$	(2)
$q_{jk} + q_{kj} = 1 \forall j, k \in J; j < k$	(3)
$C_j \geq C_k + q_{kjs} s_{kj} - q_{jk}(d_k - r_j) \forall j, k \in J; j \neq k$	(4)
$E_j \geq \delta_j - C_j \forall j \in J$	(5)
$0 \leq E_j \leq \delta_j - r_j \forall j \in J$	(6)
$T_j \geq C_j - \delta_j \forall j \in J$	(7)
$0 \leq T_j \leq d_j - \delta_j \forall j \in J$	(8)
$C_j = \delta_j - E_j + T_j \forall j \in J$	(9)

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020).

A Equação (1) retrata a função objetivo do modelo que tem desígnio de minimizar a penalidade total para os desvios do tempo alvo de pouso, a Equação (2) caracteriza a restrição da janela do tempo, as Equações (3) e (4) referem-se à restrição de garantia da separação de vórtice segura entre uma aeronave e outra, as Equações (5), (6), (7) e (8) especificam as restrições da antecipação e do atraso do pouso e a Equação (9) caracteriza a hora programada para a chegada. Conforme observado, os autores descrevem semelhanças entre o *aircraft landing problem* e problemas de *scheduling* tradicional, portanto, é possível relacionar as variáveis do modelo matemático para ambos os problemas, como demonstra o Quadro 2.

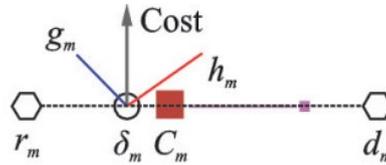
Quadro 2 - Descrição e comparativo das variáveis

Variável	<i>Machine scheduling</i>	<i>Aircraft landing problem</i>
J	Pedidos	Voos para pouso
r_j	Liberação do pedido	Primeira hora de pouso
d_j	Prazo determinado de entrega	Última hora de pouso
δ_j	Data prevista de entrega	Tempo alvo de pouso
S_{jk}	Tempo de setup	Tempo de separação de vórtice
C_j	Término do pedido	Hora programada para o pouso
P_j	Tempo de processamento	Tempo de ocupação da pista
g_j	Peso de entrega antecipada	Peso do pouso antecipado
h_j	Peso de entrega atrasada	Peso do pouso atrasado

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020).

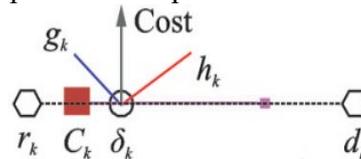
Nesse sentido, Zhang et al. (2020), ainda propõem ilustrações gráficas do problema, indicadas nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Representação temporal de um pouso executado após o horário alvo



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020).

Figura 11 - Representação temporal de um pouso executado antes do horário alvo



Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020).

A Figura 10 configura o cenário, no qual, a aterrissagem é executada após o horário ideal proposto para o voo (δ_m), considerando assim a função h_m , como a função de penalidade para o atraso, sendo r_m , o limite inferior para realização do pouso, ou seja, a partir desse momento, as pistas são liberadas para que sejam sucedidas as aterrissagens. Assim, a variável d_m , diz respeito ao momento de *deadline* da pista, no qual só é possível realizar operações nessa até esse período temporal.

Já em relação a Figura 11, esta apresenta o cenário em que o pouso é realizado com determinada antecedência diante do horário ideal de aterrissagem (δ_k). Dessa forma, a penalidade para a antecipação é feita a partir da função h_k , onde o pouso é realizado próximo ao limite inferior (r_k) e conseqüentemente, distante do momento de *deadline* (d_k). No estudo de caso realizado, é importante destacar que as restrições de limites inferiores e superiores não foram consideradas, tornando o problema parcialmente irrestrito.

4.2 HEURÍSTICA DE BUSCA LOCAL

Em decorrência da complexidade de problemas *NP*-difícil, métodos heurísticos são adequados para construir soluções eficientes, proporcionando praticidade computacional, conceitual e operacional.

Posto isso, de acordo com Song et al. (2018), esses métodos podem ser desenvolvidos a partir de estudos como *simulated annealing* (SA), *tabu search*, *genetic algorithms*, *neural*

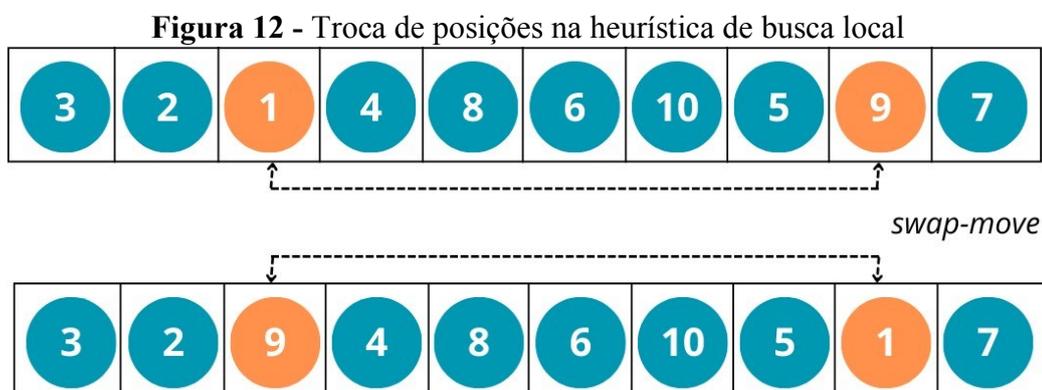
networks, *local search* (LS), *iterated local search* (ILS), dentre outras pesquisas, assim como é possível que os mecanismos de otimização sejam implementados a partir da hibridização desses estudos.

Nesse sentido, o método desenvolvido, no presente estudo, é construído a partir da metodologia *local search* (LS), dessa forma, o método heurístico consiste em melhorar uma solução proposta inicialmente através técnicas de remoção ou critérios de aceitação (Bruno et al., 2020).

Portanto, de acordo com Lourenço et al. (2019), o método heurístico baseada em busca local é constituído por quatro etapas, as etapas de constituição da solução inicial, incrementação da busca local, mecanismo de perturbação e estabelecimento do critério de aceitação. A etapa de constituição da solução inicial, é dada a partir da geração de uma solução aleatória ou então, pelo retorno de uma heurística construída de forma gulosa.

Mediante isso, a incrementação da busca local ocorre com o intuito de otimizar soluções, realizando alterações de acordo com as averiguações feitas nas vizinhanças de busca nos vetores de números inteiros, com isso são exploradas as soluções possíveis dentro da vizinhança estabelecida (Domingues, 2023).

A Figura 12 descreve como o procedimento sucede, dada a troca de posições entre elementos aleatórios vizinhos aleatórios, de modo que as trocas são feitas iterativamente, sendo assim, a cada nova solução gerada essa é ponderada com o melhor sequenciamento estabelecido até a iteração presente, de modo a estabelecer uma solução ótima, de acordo com Domingues (2023) essa movimentação é denominada *swap-move*.

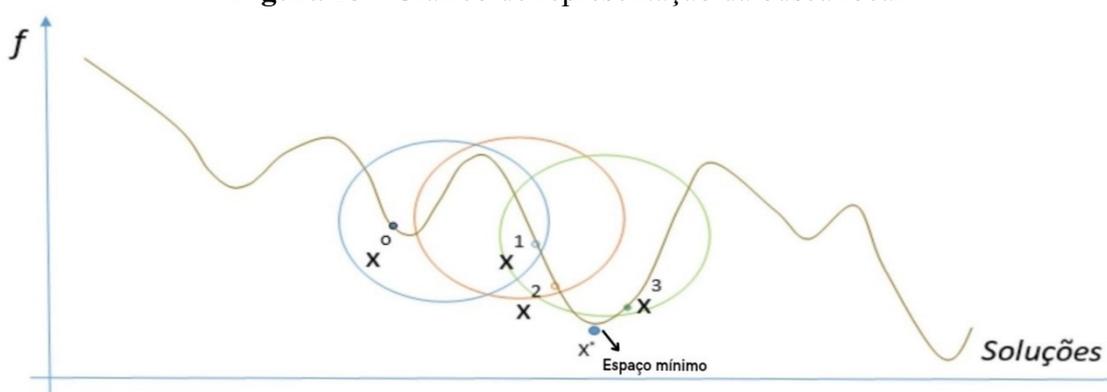


Posto isso, em conformidade com o estudo de Marques, Siqueira e Zacarias (2017), os algoritmos de otimização baseados em busca local operam sobre um universo de possibilidade, buscando circular a vizinhança, para que sejam identificados melhores resultados para uma

determinada função, nas adjacências são encontradas soluções com especificações semelhantes à solução atual.

Nessa conjuntura, os autores elucidam uma circunstância na qual é projetado minimizar uma função objetivo f , sendo a solução atual x_0 , após numerosas iterações com a vizinhança, uma nova melhor solução é detectada, dessa forma x_1 é a solução atual, conseqüentemente, novas buscas são executadas com uma nova vizinhança para a função, assim o algoritmo prosperou para encontrar a solução x_3 .

Figura 13 - Gráfico de representação da busca local



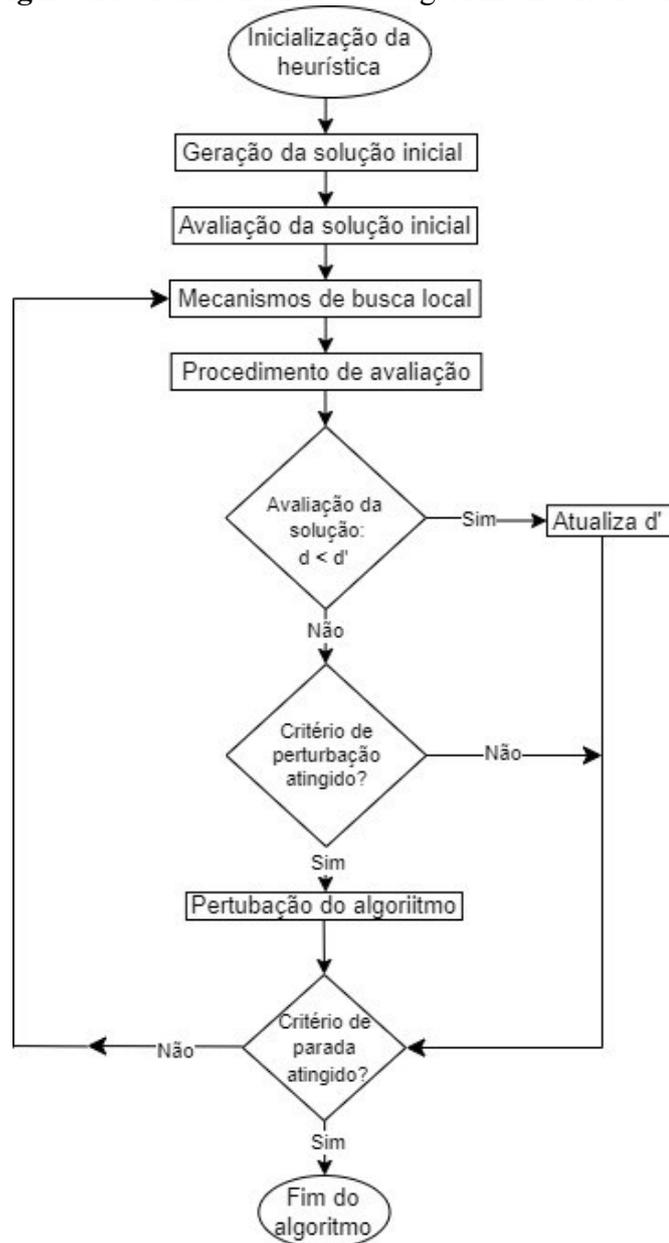
Fonte: Adaptado de Marques, Siqueira e Zacarias (2017).

Logo, Marques, Siqueira e Zacarias (2017), propuseram o gráfico ilustrado na Figura 13 para descrever a heurística de busca local, nesse é possível aferir na curva que caracteriza as soluções que existe um espaço mínimo nomeado x^* , esse está localizado entre a solução x_2 e x_3 , esse ponto indicado um local que a busca local não foi habilitada para encontrar, porém isso não denota que a solução não evoluiu.

Dessa forma, para que o algoritmo não realize pesquisas em somente um espaço do campo estabelecido, é preciso constituir um mecanismo de perturbação. Já o critério de aceitação é o fator que determina a vigência de uma nova solução encontrada como a melhor solução proposta.

Com base nisso, foi elaborado o algoritmo heurístico LS desta pesquisa, esse é formado por uma solução inicial, um condicionamento de avaliação (critério de aceitação), a implementação de uma heurística de busca local e a elaboração dos mecanismos perturbação, a Figura 14 ilustra o algoritmo proposto.

Figura 14 - Funcionamento do algoritmo heurístico LS



Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 HEURÍSTICA LS PARA O *AIRCRAFT LANDING PROBLEM*

A heurística LS da pesquisa tem o desígnio de estabelecer uma solução para o ALP que determine um sequenciamento de voos que minimizem a divergência entre os horários ideais e os horários efetivos dos pousos em um aeroporto. Para isso, são considerados tanto os atrasos como as antecipações. As funções no algoritmo são executadas de forma iterativa, ou seja, as atividades ocorrem de forma repetitiva dentro de um ciclo, proporcionando assim, uma solução adequada ao problema.

De maneira geral, o algoritmo é fundamentado a partir de uma solução inicial, gerada aleatoriamente. As soluções são avaliadas através dos cálculos da divergência entre os horários ideais e reais, nesse algoritmo, é implementada uma heurística de busca local que realiza troca nas vizinhanças para elaborar sequenciamentos de pousos, visando por intermédio da heurística, otimizar a solução para o *aircraft landing problem*. Além de que, são inseridos mecanismos de busca inteligente e perturbação para garantir que as soluções sejam efetuadas em espaços onde são otimizadas de forma efetiva.

4.3.1 Geração da solução inicial

A geração da solução inicial se faz necessária no algoritmo heurístico, em virtude de proporcionar uma diversificação de busca e exploração abrangente no espaço de busca do problema, no qual são geradas as soluções propostas para o problema. Por intermédio da solução inicial, o risco de as buscas serem realizadas apenas em espaços de mínimos locais é minimizado.

Desse modo, a geração da solução inicial aleatória da heurística LS para o ALP, ocorreu de maneira gulosa, ou seja, de forma que as soluções são aleatoriamente e não ponderam o cenário geral do algoritmo, sendo assim o sequenciamento é gerado a partir de um dado momento em que escolha é dita como localmente ótima.

4.3.2 Avaliação da solução

O componente de avaliação da solução tem como finalidade calcular o valor da divergência de cada uma das soluções s formadas pelo algoritmo, considerando tanto o sequenciamento gerado na solução inicial, como as soluções advindas do *loop* de iteração. Contudo, é necessário, computar previamente os instantes de tempo de cada um dos voos da solução s . No algoritmo LS, os tempos são computados por meio da variável P , na qual o instante de pouso de um voo é somado com seu tempo de setup (S), de modo que é calculado de maneira consecutiva, ou seja, é somado também ao tempo do voo anterior.

Com isso nas variáveis T e E , são estabelecidos os parâmetros de atraso e antecipação, em T , calcula-se o atraso de um voo, já em E , a antecipação, esses cenários são observados nas Figuras 10 e 11 do modelo matemático do ALP. Posto isto, esses valores são armazenados na variável d , essa resulta na divergência de um voo com relação ao seu horário ideal (Hi). A sequência dessas funções é caracterizada no Algoritmo 1.

Mediante o cálculo da divergência, é possível verificar se essa possui um menor valor do que a melhor divergência vigente no algoritmo, caso esse parâmetro seja cumprido, a divergência (d) passa a ser armazenada como a menor divergência (d'), bem como, a solução s , nesse momento, é considerada a melhor solução s' .

Algoritmo 1 – Avaliação da solução inicial

```

1: Para cada iteração do LS
2:    $P = 0$ 
3:    $d = 0$ 
4:   Para  $i = 1$  até  $N$ 
5:      $P = P + Setup$ 
6:     Se  $P - Hi > 0$  então
7:        $T = P - Hi$ 
8:        $E = 0$ 
9:     Senão
10:       $E = Tp - Hi$ 
11:       $T = 0$ 
12:     Fim se
13:      $d = d + T + E$ 
14:   Fim para
15:   Se  $d < d'$  então
16:      $d' = d$ 
17:     Para  $i = 1$  até  $N$ 
18:        $s' = s$ 
19:     Fim para
20:   Fim se

```

4.3.3 Busca local

A heurística de busca local implementada no algoritmo tem como objetivo explorar uma solução ótima para o ALP, utilizando trocas na vizinhança de busca e iterações de avaliação. Nessa heurística, são inseridos mecanismos de busca de perturbação. Para realizar as trocas nas vizinhas de busca, é necessário determinar o número de trocas que devem ser feitas. Nesse algoritmo, o número de trocas ocorre de acordo com o número de voos da instância, ou seja, o algoritmo gera um número de trocas aleatórias para serem efetuadas na sequência de voos, obedecendo o critério de as trocas serem feitas em até 10% do número de voos, este procedimento é denominado *swap*.

No Algoritmo 2 de busca local, após a geração do swap e das posições, essas são trocadas na sequência s , de modo que esses são avaliadas, para assim, serem verificadas a qualidade das soluções após as devidas trocas.

Algoritmo 2 – Busca local

```

1: Para iteração = 1 até MaxIteração
2:   Gere uma quantidade aleatória  $Q$  entre 1 e  $0.1 * N$ 
3:   Para  $j = 1$  até  $N$ 
4:     Selecione duas posições
5:     Troque duas posições aleatórias diferentes
6:   Fim para
7:   Mecanismo de avaliação da solução
8:   Mecanismo de perturbação
9: Fim para

```

Na busca local, os mecanismos de perturbação são inseridos para aumentar a eficácia e capacidade de otimização do código, portando os mecanismos indicados no de *loop* de iteração são discutidos no tópico 4.3.4.

4.3.4 Mecanismo de perturbação

Os mecanismos de perturbação são utilizados no algoritmo LS para potencializar as estratégias de otimização, de acordo com Wang et. al. (2017), esses são inseridos nos algoritmos heurísticos para evitar que as iterações sejam desempenhadas somente em locais mínimos subótimos, isso não ocorre devido à diversificação da busca proposta pelos mecanismos.

Associado a isso, para evitar que os resultados das divergências atinjam valores altos e dispersos, realiza-se a troca do sequenciamento (s) gerado em uma iteração n , quando a divergência dessa exceder em 140% a divergência do melhor sequenciamento (s') proposto até a iteração n .

Bem como, a geração de uma nova solução aleatória, para que ao atingir 25% do número máximo de iterações, o código gera uma solução inicial, o controle das iterações é feito por intermédio de um contador declarado no início da formação da busca local.

4.4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Para aplicação do algoritmo heurístico de busca local foram coletados dados do Aeroporto Internacional do Recife/Guararapes, por meio das plataformas *FlightStats* e *FlightRadar24*, além de informações coletadas na literatura. Nesse estudo foram utilizadas três instâncias reais de 95 voos, distribuídas em diferentes dias de uma semana, para que assim fosse viável observar distintos comportamentos.

O algoritmo proposto foi implementado a partir da linguagem de programação *Visual Basic for Applications (VBA)* e executado em um computador Intel(R) Core(TM) i3-

10110UCPU com 2.10GHz, 4 GB RAM e sistema operacional utilizado foi o *Windows 10*. Com isso, foram conduzidas dez execuções de cada uma das instâncias, as divergências totais advindas dos sequenciamentos propostos pelo algoritmo, essas são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Divergências totais advindas dos sequenciamentos propostos pelo algoritmo LS

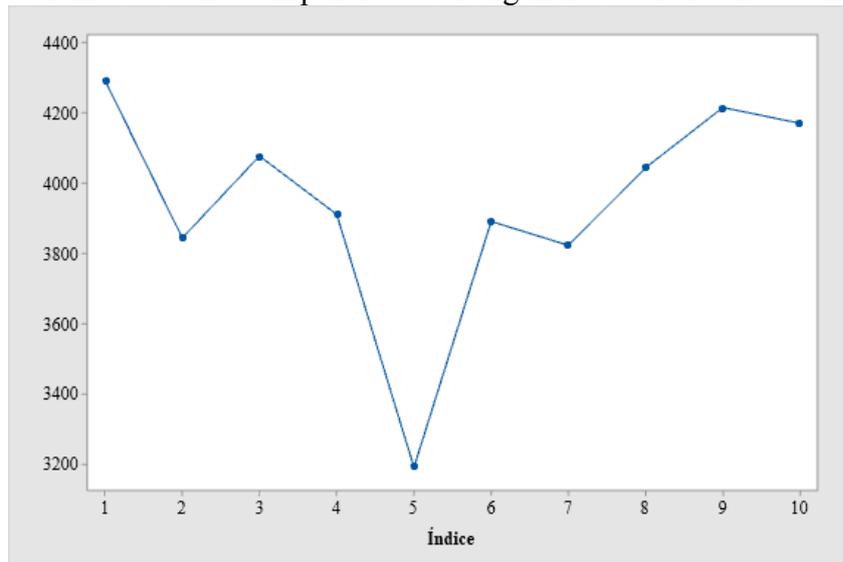
Execução	Divergência total (UT)		
	Instância 1	Instância 2	Instância 3
1	4292	4199	3547
2	3844	3199	4026
3	4077	4104	3961
4	3911	4174	4280
5	3192	3621	3942
6	3891	4187	3421
7	3823	4110	4126
8	4044	3923	3518
9	4215	3767	3652
10	4170	3822	4275

Fonte: Autoria própria (2024).

Para encontrar a melhor divergência das soluções geradas, foi estabelecido que ocorressem mil iterações na vizinhança de busca da solução. Além disso, para estruturação da programação foram utilizados intervalos de tempo unitário, nos quais 1 unidade de tempo (UT) equivale a cinco minutos.

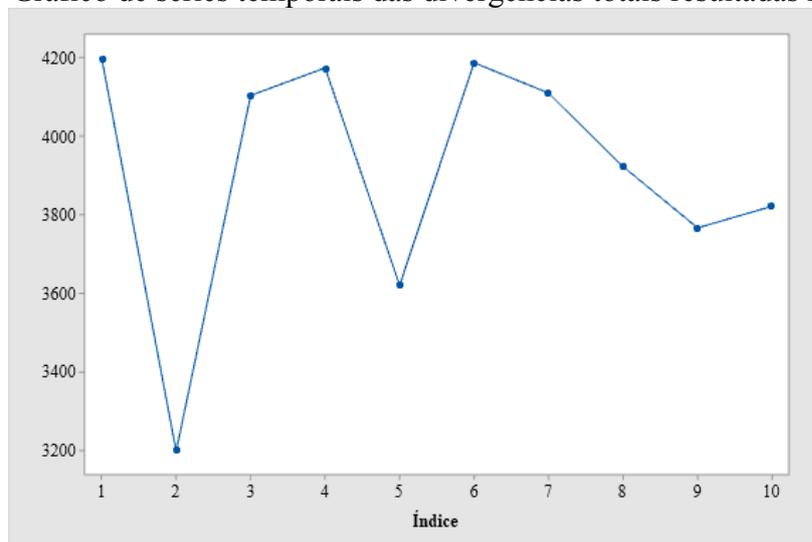
Nesse sentido, os gráficos de séries temporais das Figuras 15, 16 e 17, elaborados por meio do software *Minitab*, demonstram o comportamento provenientes das divergências totais encontradas a partir de aplicações do método.

Figura 15 - Gráfico de séries temporais das divergências totais resultadas na instância 1

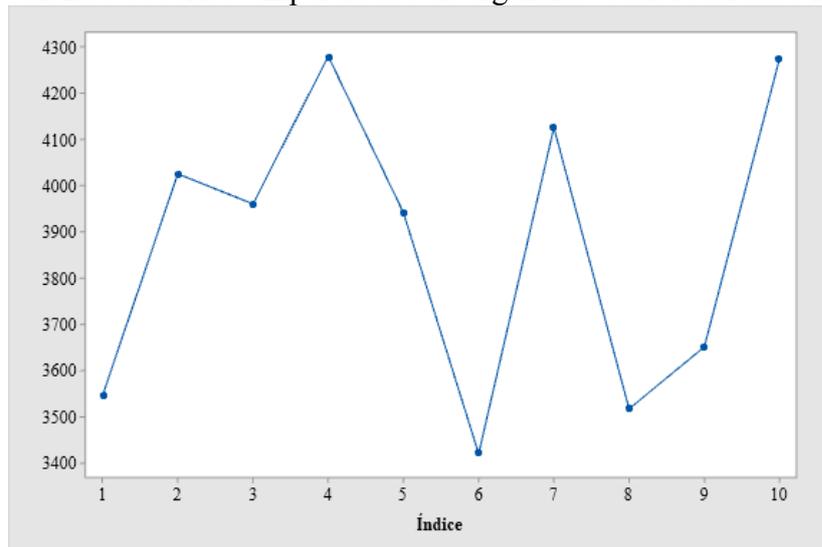


Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 16 - Gráfico de séries temporais das divergências totais resultadas na instância 2



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 17 - Gráfico de séries temporais das divergências totais resultadas na instância 3

Fonte: Autoria própria (2024).

Com base na análise dos gráficos, é possível compreender que na primeira instância, o menor valor de divergência entre as execuções foi de 3192 UT, já o maior indicador alcançado nessa instância foi de 4292 UT.

Na segunda instância, o menor valor identificado foi de 3199 UT e o maior valor foi de 4199 UT, e portanto, na terceira instância o dado mínimo identificado foi de 3421 UT e o valor máximo foi de 4280 UT.

Quanto a parâmetros de estatística descritiva, como média e desvio padrão as divergências totais conceberam os valores caracterizado na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de estatística descritiva para as divergências totais das instâncias

Parâmetro de estatística descritiva	Divergência total (UT)		
	Instância 1	Instância 2	Instância 3
Média	3945,9	3911	3875
Desvio padrão	310,4	321	318

Fonte: Autoria própria (2024).

Ao relacionar os parâmetros das instâncias, infere-se que a instância 3 alcançou a menor média de 3875 UT e a instância 1, a maior média de 3945,9 UT. Paralelamente, o menor desvio padrão encontrado foi o da instância 1 de 310,4 UT e a maior desvio padrão foi o da instância 2.

Vale ressaltar que a comparação direta com outros métodos foi inviabilizada nesse estudo, visto que os dados foram coletados e estruturados para essa análise, e dessa forma apenas o mecanismo estudado foi aplicado nas instâncias construídas.

Contudo, o método desenvolvido neste estudo para o problema de pouso de aeronaves caracteriza-se como factível, em virtude de a análise dos resultados indicar que as soluções obtidas são adequadas para aplicação prática, com tempos de execução computacional considerados curtos em relação aos métodos tradicionais e dentro de um intervalo viável para operações aeroportuárias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em decorrência do grau de complexidade e importância determinado pelo problema de pouso de voo, pesquisadores buscam proporcionar o aumento de estudos acerca da temática, já que essa reflete a circunstância desafiadora encontrada no contexto da aviação moderna. Sendo assim, é necessário que os dirigentes operações aeroportuárias encontrem formas de otimização para as atividades, em um cenário que seja garantido a segurança, a eficiência e a pontualidade das aeronaves.

Nesse contexto, o *aircraft landing problem* é caracterizado por um conjunto de variáveis e restrições que, sobretudo, procuram desempenhar um gerenciamento de separações seguras das aeronaves no ar, a minimização dos atrasos e a relevância de fatores operacionais. Com isso, à medida que o setor aéreo enfrenta dificuldades voltadas para capacidade e eficiência, os estudos sobre o ALP tornam-se relevantes, para que a melhoria contínua das operações seja estabelecida.

Dessa forma, o estudo demonstrou o desenvolvimento de uma heurística de busca local (LS) aplicada ao problema de pouso de aeronaves, essa abordagem tem como objetivo minimizar as divergências entre os horários ideais e os horários reais de pouso em um aeroporto com pista única.

A heurística construída demonstrou parâmetros de funcionamento eficientes para otimização do sequenciamento de pousos, conforme é descrito nos resultados computacionais, foram obtidas nos experimentos feitos a partir de três instâncias baseadas em dados reais do Aeroporto Internacional de Recife/Guararapes, divergências totais médias entre estão 3875 UT e 3945 UT, com desvio padrão entre 310,4 UT e 321 UT nas dez execuções que as instâncias foram submetidas, o que demonstra uma eficiência admissível do método para propor soluções que podem reduzir atrasos e antecipações de voos, estabelecendo uma possível eficiência operacional para o aeroporto.

Atrelado a isso, os resultados indicam que a abordagem foi capaz de fornecer soluções categóricas em um tempo computacional viável, representando assim, que essa é uma ferramenta prática para gestão do tráfego aéreo. Outro fator que possibilitou a efetividade do método foi a constituição de um mecanismo de perturbação, esse dificultou que a busca ficasse estagnada em um mínimo local, e assim, a otimização das soluções encontradas foi potencializada.

Contudo, foram encontradas limitações centrais no decorrer do estudo, essas estavam vinculadas, sobretudo, a fatores como, o escopo da abordagem é limitado a uma única pista de

pouso, ou seja, não viabilizada a construção de resultados a partir do método para aeroportos com múltiplas pistas, bem como não foi possível, realizar a coleta de dados e análise acerca da forma como os atrasos são originados no aeroporto estudado, sendo assim, a pesquisa não abordou se os atrasos observados na base de dados são advindos de efeito cascata, condições meteorológicas adversas ou falha no gerenciamento das operações.

Portanto, como sugestão para estudos futuros são recomendadas pesquisas voltadas para a implementação de outras heurísticas e meta-heurísticas, como por exemplo, abordagens fundamentadas em algoritmos genéticos e *simulated annealing*, para que seja comparada a performance do tempo de execução e a qualidade das soluções entre os métodos. Ademais, também podem ser sucedidos estudos para adequar o modelo, para que esse possa ser utilizado em um aeroporto com múltiplas pistas, ou a inserção de novas restrições operacionais, de modo que possam ser incluídos fatores como, condições meteorológicas adversas e variações no fluxo de tráfego aéreo. Por fim, outra pesquisa que pode enquadrada no escopo de aplicação prática desse estudo, é a realização de uma análise aprofundada da propagação de atrasos em redes de aeroportos interconectados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Ana Sofia Santos. **Transporte aéreo e desenvolvimento regional**. 2018. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018.
- ALMEIDA, Ítalo D'artagnan. **Metodologia do trabalho científico**. Recife: Ed. Ufpe, 2021.
- ALMEIDA, João Victor Portilho et al. Infraestrutura aeroportuária brasileira: uma análise do modal. **Revista Científica Unilago**, v. 1, n. 1, 2019.
- ANAC. Por dentro da aviação: Aeroportos. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/centrais-de-conteudo/por-dentro-da-aviacao/arquivos/cartilha-por-dentro-da-aviacao-aeroportos.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- AZEVEDO, Beatriz Flávia; ROCHA, Ana Maria A. C.; PEREIRA, Ana I.. Hybrid approaches to optimization and machine learning methods: a systematic literature review. **Machine Learning**, [S.L.], v. 113, n. 7, p. 4055-4097, 24 jan. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10994-023-06467-x>.
- BARBOSA, João Batista Mendes. **APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO HEURÍSTICO PARA MINIMIZAÇÃO DO MAKESPAN EM UM PROBLEMA DE FLOW SHOP COM CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS: o caso de uma indústria de produtos de limpeza**. 2024. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.
- BENCHEIKH, Ghizlane; BOUKACHOUR, Jaouad; ALAOU, Ahmed EL Hilali. Improved ant colony algorithm to solve the aircraft landing problem. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, v. 3, n. 2, p. 224, 2011.
- BENDINELLI, William E.; OLIVEIRA, Alessandro VM. Determinantes concorrenciais dos atrasos dos voos no aeroporto e na rota. **arXiv preprint arXiv:2402.11373**, 2024.
- BORSE, Yogita et al. Flight Delay Prediction System. **Int. J. Eng. Res. Technol**, v. 9, n. 3, p. 88-92, 2020.
- BRISKORN, Dirk; STOLLETZ, Raik. Aircraft landing problems with aircraft classes. **Journal Of Scheduling**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 31-45, 15 jun. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10951-013-0337-x>.
- BRUNO, Lucas et al. **Uma heurística híbrida para o gerenciamento de recursos na virtualização de funções de rede**. In: Anais Estendidos do X Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais. SBC, 2020. p. 139-144.
- BUDD, Lucy; ISON, Stephen. The airport industry. In: HALPERN, Nigel e GRAHAM, Anne. **The Routledge Companion to Air Transport Management**. Londres: Routledge, 2018. p. 1-468.

BURKE, Edmund K.; KENDALL, Graham. **Search Methodologies**: introductory tutorials in optimization and decision support techniques. 2. ed. Nova York: Springer New York, Ny, 2014. 716 p.

CARVALHO, Leonardo; STERNBERG, Alice; GONÇALVES, Leandro Maia; CRUZ, Ana Beatriz; SOARES, Jorge A.; BRANDÃO, Diego; CARVALHO, Diego; OGASAWARA, Eduardo. On the relevance of data science for flight delay research: a systematic review. **Transport Reviews**, [S.L.], v. 41, n. 4, p. 499-528, 24 dez. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2020.1861123>.

CASTRO, Antônio Augusto Ferreira; GOMES, Helton Cristiano Junior; GUIMARÃES, Irce Fernandes Gomes; SOUZA, Larissa Aparecida Lopes. Ferramenta de determinação de valores para parâmetros de entrada para métodos met-heurísticos. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, XLIII, 2023, Fortaleza. *Anais eletrônicos...* Rio de Janeiro: ABEPRO, 2023.

CHAGAS, Vinícius de Araujo. **Os desafios para o transporte aéreo de cargas**. 2022. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Aeronáuticas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.

CHEN, Gong; FRICKE, Hartmut; OKHRIN, Ostap; ROSENOW, Judith. Flight delay propagation inference in air transport networks using the multilayer perceptron. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 114, p. 102510, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102510>.

CHEN, Yun-Hsuan; LIN, Jen-Jia. Determinants of flight delays at East Asian airports from an airport, route and network perspective. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 94, p. 102064, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102064>.

Conselho de Monitoramento e Avaliação de Políticas Públicas. **Relatório de Avaliação: Operação do Sistema de Controle do Espaço Aéreo (SISCEAB)**. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/acao-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/cmap/politicas/2020/gastos-diretos/relatorio_avaliacao-cmag-2020-sisceab.pdf. Acesso em: 11 ago. 2024.

CONSERVA, J. C. V.; SILVA, Y. L. T. V. A hybrid evolutionary metaheuristic proposal applied to job-shop scheduling problems with earliness and tardiness penalties. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 24, n. 1, p. 31-57, 2024.

DE CARVALHO ANDRÉ, M. V.; DA SILVA, H. L. R.; SILVA, Y. L. T. V. A local search heuristic for nurse assignment problems with personal preferences. **Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE**, v. 10, n. 2, p. 70-81, 2024. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v10i2.44130>

DIXIT, Aasheesh; JAKHAR, Suresh Kumar. Airport capacity management: a review and bibliometric analysis. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 91, p. 102010, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.102010>.

DOMINGUES, Davi Rezende. **Uma Abordagem Heurística para o Problema de Roteamento e Localização de Facilidades com o Uso de Drones**. 2023. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.

DUBE, Kaitano; NHAMO, Godwell; CHIKODZI, David. COVID-19 pandemic and prospects for recovery of the global aviation industry. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 92, p. 102022, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102022>.

EUROCONTROL. **All-Causes Delays to Air Transport in Europe - Quarter 2 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/publication/all-causes-delays-air-transport-europe-quarter-2-2023>. Acesso em: 15 maio 2024.

FAYE, Alain. Solving the Aircraft Landing Problem with time discretization approach. **European Journal Of Operational Research**, [S.L.], v. 242, n. 3, p. 1028-1038, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.064>.

FERNANDES, Helen Feuser et al. Avaliação dos requisitos da faixa de pista em aeroportos regionais: uma análise de risco. **Transportes**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 76-91, 28 dez. 2018. Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v26i2.1478>.

FLIGHTSTATS. Global flight delay percentage 2023. Disponível em: <https://www.flightstats.com>>. Acesso em: 17 set. 2024.

FORSYTH, Peter et al. Covid -19, the collapse in passenger demand and airport charges. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 89, p. 101932, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101932>.

FREITAS, Ângela Maria de. **Funcionamento executivo em controladores de tráfego aéreo do sul do brasil**. 2016. 72 f. Tese (Doutorado) - Curso de Medicina e Ciências da Saúde, Funcionamento Executivo em Controladores de Tráfego Aéreo do Sul do Brasil, Porto Alegre, 2016.

GENDREAU, Michel; POTVIN, Jean-Yves. **Handbook of Metaheuristics**. 3. ed. Montreal: Springer Cham, 2019. 604 p.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GILLEN, D. Impacts of liberalisation in global mature markets. In: HALPERN, Nigel e GRAHAM, Anne. **The Routledge Companion to Air Transport Management**. Londres: Routledge, 2018. p. 1-468.

GIRISH, B. S. An efficient hybrid particle swarm optimization algorithm in a rolling horizon framework for the aircraft landing problem. **Applied Soft Computing**, [S.L.], v. 44, p. 200-221, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.011>.

GODOY, Roberta Fernanda et al. Operacionalização da metodologia Kaizen a fim de otimizar o desempenho organizacional: um enfoque na gestão de processos em uma indústria eletrônica. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 2, p. 1832-1854, 2023.

GOLDBARG, Elizabeth; GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique P. L. **Otimização Combinatória e Meta-heurísticas - Algoritmos e Aplicações**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

GUERRA, Avaetê de Lunetta e Rodrigues. METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA E ACADÊMICA. **Zenodo**, Campina Grande, v. 1, n. 2, p. 149-159, 12 ago. 2023. Zenodo. <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.8240361>.

GUIMARÃES, Gabriel Dutra. **Os impactos econômicos do transporte aéreo regular para o setor o turismo nacional no período de 2019 a 2021**. 2023. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Aeronáuticas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2023.

HAMMOURI, Abdelaziz I. et al. **ISA: a hybridization between iterated local search and simulated annealing for multiple-runway aircraft landing problem**. *Neural Computing and Applications*, v. 32, p. 11745-11765, 2020.

HARIFI, Sasan; MOHAMMADZADEH, Javad; KHALILIAN, Madjid; EBRAHIMNEJAD, Sadoullah. Giza Pyramids Construction: an ancient-inspired metaheuristic algorithm for optimization. **Evolutionary Intelligence**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 1743-1761, 13 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12065-020-00451-3>.

HOLLAENDER, Paulo Sodre. **Gestão de operações aeroportuárias: um estudo sobre práticas direcionadoras de eficiência em aeroportos internacionais brasileiros**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção e de Manufatura, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2019.

IATA. 2017. Disponível em: <https://www.iata.org/>. Acesso em: 25 mar. 2023.

IATA. **20-Year Air Passenger Forecast**. Geneva: International Air Transport Association, 2023. Disponível em: <https://www.iata.org/en/publications/store/20-year-air-passenger-forecast/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

IKLI, S.; MANCEL, C.; MONGEAU, M.; OLIVE, X.; RACHELSON, E.. An Optimistic Planning Approach for the Aircraft Landing Problem. **Lecture Notes In Electrical Engineering**, [S.L.], p. 173-188, 2021. Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-33-4669-7_10.

ICAO, Organização Internacional de Aviação Civil. **Annual Report 2018**. 2018. Disponível em: <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/default.aspx>. Acesso em: 15 jun. 2024.

JASSAM, Abdulrahman; ABDULLAH, Omar Salim; ABDULLAH, Salwani; BASSEL, Atheer. Single Runway Aircraft Landing Scheduling Using Simulated Annealing and Exact Timing Method. **Communications In Computer And Information Science**, [S.L.], p. 302-311, 2020. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-38752-5_24.

JIANG, Hong; REN, Xinhui. Model of passenger behavior choice under flight delay based on dynamic reference point. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 75, p. 51-60, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.11.008>.

KIM, Myeonghyeon; PARK, Sunwook. Airport and route classification by modelling flight delay propagation. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 93, p. 102045, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102045>.

KIM, Sang Hyun; FERON, Eric; CLARKE, John-Paul; MARZUOLI, Aude; DELAHAYE, Daniel. Airport Gate Scheduling for Passengers, Aircraft, and Operations. **Journal Of Air Transportation**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 109-114, out. 2017. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

LI, Yuanmao; LIU, Guixiong; DENG, Wei; LI, Zuyu. Comparative study on parameter identification of an electrochemical model for lithium-ion batteries via meta-heuristic methods. **Applied Energy**, [S.L.], v. 367, p. 123437, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123437>.

LIU, Ming et al. **A two-stage stochastic programming approach for aircraft landing problem**. In: 2018 15th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM). IEEE, 2018. p. 1-6.

LIU, Yu-Hsin. A genetic local search algorithm with a threshold accepting mechanism for solving the runway dependent aircraft landing problem. **Optimization Letters**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 229-245, 23 maio 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11590-010-0203-0>.

LIU, Yulin; YIN, Mogeng; HANSEN, Mark. Economic costs of air cargo flight delays related to late package deliveries. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [S.L.], v. 125, p. 388-401, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.017>.

LOURENÇO, Helena Ramalinho; MARTIN, Olivier C.; STÜTZLE, Thomas. **Iterated local search: Framework and applications**. Handbook of metaheuristics, p. 129-168, 2019.

MARODIN, Rafael Conte et al.. **Aplicação de algoritmo prim com multi-start e busca local para minimização de perdas de sistemas de distribuição**. Anais do V CONAPESC... Campina Grande: Realize Editora, 2020. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/73122>>.

MARQUES, T. B.; SIQUEIRA, L. S.; ZACARIAS, R. O. Busca local com permute all pairs aplicada ao problema de alocação de facilidades. In: Computer on the Beach, 8., 2017, Florianópolis. Anais [...], Florianópolis, 2017, p. 446-455.

MASSAMBANI, Nathalia. **Investigação de Múltiplos Pontos de Ótimo do Problema de Despacho Econômico com Efeito dos Pontos de Carregamento de Válvula Através de um Método Baseado em Sistemas Dinâmicos**. 2024. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2024.

MAYER, Robert et al. Taught postgraduate air transport management degrees in the UK: a systematic review and analysis. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 119, p. 102647, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102647>.

MORAES, Gildete dos Santos. **ANÁLISE DOS MODAIS DE FOZ DO IGUAÇU**. 2018. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Centro Universitário Uniamérica, Foz do Iguaçu, 2018.

MORAIS, Rafael; BULHOES, Teobaldo; SUBRAMANIAN, Anand. **Uma heurística híbrida para o problema de escalonamento de tarefas em uma máquina com tempos de setup dependentes da sequência e datas de liberação**. In: Anais do VIII Encontro de Teoria da Computação. SBC, 2023. p. 170-174.

MOURA, I. R.; COSTA, L. H. G.; SANTOS, E. M.; PINTO, E. M. C.; VIANA, H. R. G. (2021). **Impacto de fatores macroeconômicos na movimentação de passageiros no transporte aéreo**. Anais do 9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável: Pequenas cidades, grandes desafios, múltiplas oportunidades. UNESP, Bauru, 07-09 abril 2021.

MUCHIUTTI, Mayara Costa; CANCISSÚ, Selton Rafael. **MODAL AÉREO: VANTAGENS E DESVANTAGENS NO TRANSPORTE DE CARGAS NO PARANÁ**. 2019. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnólogo em Gestão de Logística, Instituto de Ensino Superior de Londrina, Londrina, 2019.

MURÇA, Mayara Condé Rocha; MÜLLER, Carlos. **O PROBLEMA DO SEQUENCIAMENTO DE AERONAVES PARA POUSO: ANÁLISE PARA O CASO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SÃO PAULO/GUARULHOS**.

NASCIMENTO, F. Classificação da Pesquisa. Natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. In: NASCIMENTO, F. (org.). *Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática—como elaborar TCC*. Brasília: Thesaurus, 2016.

NG, K. K. H.; LEE, C. K. M. **Makespan minimization in aircraft landing problem under congested traffic situation using modified artificial bee colony algorithm**. In: 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, 2016. p. 750-754.

PAMPLONA, Daniel Alberto; MURÇA, Mayara Condé Rocha; BARROS, Alexandre Gomes de; ALVES, Claudio Jorge Pinto. Uma abordagem metaheurística para o sequenciamento de aeronaves para pouso e o aumento de capacidade de pista. *Transportes*, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 2500, 28 out. 2021. Programa de Pos Graduacao em Arquitetura e Urbanismo. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v29i4.2500>.

PINEDO, Michael L.. **Scheduling: theory, algorithms, and systems**. 6. ed. Nova York: Springer Cham, 2022. 698 p.

PLAZAS, Heitor Martins. **ALOCAÇÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO UM ALGORITMO HEURÍSTICO CONSTRUTIVO**. 2023. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Estadual Paulista, Rosana, 2022.

RAIHAN, Asif; VOUMIK, Liton Chandra; AKTER, Salma; RIDZUAN, Abdul Rahim; FAHLEVI, Mochammad; ALJUAID, Mohammed; SANIUK, Sebastian. Taking flight: exploring the relationship between air transport and malaysian economic growth. *Journal Of*

Air Transport Management, [S.L.], v. 115, p. 102540, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102540>.

RAMOS, Angela di Giovanni. **GESTÃO DE PEQUENOS AEROPORTOS NO BRASIL**. 2021. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Capacitação de Segurança Operacional Para Gestores de Aeroportos Classe I, Isec Lisboa I Instituto Superior de Educação e Ciências, Lisboa, 2021.

RUBIO-ANDRADA, Luis; CELEMÍN-PEDROCHE, María Soledad; ESCAT-CORTÉS, María-Dolores; JIMÉNEZ-CRISÓSTOMO, Abel. Passengers satisfaction with the technologies used in smart airports: an empirical study from a gender perspective. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 107, p. 102347, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102347>.

SALEHIPOUR, Amir; MODARRES, Mohammad; NAENI, Leila Moslemi. An efficient hybrid meta-heuristic for aircraft landing problem. **Computers & Operations Research**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 207-213, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2012.06.004>.

SAMÀ, Marcella et al. Integration methods for aircraft scheduling and trajectory optimization at a busy terminal manoeuvring area. **Or Spectrum**, v. 41, p. 641-681, 2019.

SAMPAIO, Aghata Ingridi de Sousa. **O transporte aéreo de passageiros e o sistema aduaneiro: o caso do aeroporto internacional de Foz do Iguaçu-PR**. 2023. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Geografia, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023.

SAMPAIO, Tuane Bazanella. Metodologia da pesquisa. 1. ed. Santa Maria, RS: UFSM, CTE, UAB, 2022.

SANDRINE. **Modeling and Solving the Aircraft Landing Problem**. 2021. Disponível em: <https://www.localsolver.com/tutorial/aircraft-landing-problem>. Acesso em: 15 mar. 2021.

SANTOS, Bruno César de Brito; SILVA, João Paulo V. Ferreira da; MENEZES, Marlene dos Santos; FREITAS, Rafael Azevedo; QUEIROZ, Thaís Batista; SOUSA, Waldek Rangel de. **Melhoria na eficiência operacional no processo de embarque e desembarque dos aeroportos brasileiros**. 2018. 107 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Gestão de Negócios, Fundação Dom Cabral, Salvador, 2018.

SANTOS, Mariane Emanuelle Pessoa. **Uma abordagem heurística de busca local para problemas de sequenciamento da produção em máquinas paralelas com release dates e tempos de setup**. 2023. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, 2023.

SCHMIDT, Michael. A review of aircraft turnaround operations and simulations. **Progress In Aerospace Sciences**, [S.L.], v. 92, p. 25-38, jul. 2017. Elsevier BV.

SHAKIL, S. M.; MOSTAFA, Kazi Adnan. An Analysis of the Advantages and Disadvantages of Using a Multimodal Transport System in the Carriage of Goods. **International Journal of Law, Humanities & Social Science**, v. 2, n. 4, p. 60-69, 2018.

SILVA, Leonardo Bruno Morais Vieira da. **ANÁLISE MULTICRITÉRIO DE DESEMPENHO DA INFRAESTRUTURA AEROPORTUÁRIA: ESTUDO DE CASO NOS PRINCIPAIS AEROPORTOS BRASILEIROS**. 2018. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2018.

SILVA, Y. L. T. V.; SILVA, N. E. F. A hybrid non-dominated sorting genetic algorithm with local search for portfolio selection problem with cardinality constraints. **Exacta**, v. 22, n. 3, p. 788-819, 2024. <https://doi.org/10.5585/2023.22046>

SLACK, N.; BRANDON-JONNES, P.; JOHNSON, R. *Administração da produção*. 10. ed. São Paulo: **Editora Atlas**, 2023.

SONG, Cen; GUO, Jingquan; ZHUANG, Jun. Analyzing passengers' emotions following flight delays- a 2011–2019 case study on SKYTRAX comments. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 89, p. 101903, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101903>.

SONG, Cen; MA, Xiaoqian; ARDIZZONE, Catherine; ZHUANG, Jun. The adverse impact of flight delays on passenger satisfaction: an innovative prediction model utilizing wide & deep learning. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 114, p. 102511, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102511>.

SONG, Ting et al. **An iterated local search algorithm for the University Course Timetabling Problem**. *Applied Soft Computing*, v. 68, p. 597-608, 2018.

SOUZA, Entony Santos. **Análise da logística aeroportuária de carga nos principais aeroportos da região Norte do Brasil**. 2022. 30 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Aeronáuticas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.

STERNBERG, Alice et al. A review on flight delay prediction. **arXiv preprint arXiv:1703.06118**, 2017.

TAN, Xinlong; JIA, Rongwen; YAN, Jia; WANG, Kun; BIAN, Lei. An Exploratory analysis of flight delay propagation in China. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 92, p. 102025, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102025>.

TARNOWSKI, Carlos Eduardo Romancini. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA HEURÍSTICA BUSCA LOCAL DIRIGIDA NA MINIMIZAÇÃO DE SETUP EM EMPRESA DO SEGMENTO DE PLÁSTICO FLEXÍVEL**. 2021. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

THIAGARAJAN, Balasubramanian et al. A machine learning approach for prediction of on-time performance of flights. In: **2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)**. IEEE, 2017. p. 1-6.

TRUONG, Dothang. Using causal machine learning for predicting the risk of flight delays in air transportation. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 91, p. 101993, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101993>.

VADLAMANI, Satish; HOSSEINI, Seyedmohsen. A novel heuristic approach for solving aircraft landing problem with single runway. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 40, p. 144-148, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2014.06.009>.

VÉLEZ-GALLEGO, Mario C.; MAYA, Jairo; MONTOYA-TORRES, Jairo R.. A beam search heuristic for scheduling a single machine with release dates and sequence dependent setup times to minimize the makespan. **Computers & Operations Research**, [S.L.], v. 73, p. 132-140, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2016.04.009>.

VERESNIKOV, G. S. et al. Methods for Solving of the Aircraft Landing Problem. I. Exact Solution Methods. **Automation And Remote Control**, [S.L.], v. 80, n. 7, p. 1317-1334, jul. 2019. Pleiades Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1134/s0005117919070099>.

VIANNA, Bárbara Lessa. **Métodos exato e heurístico para resolução do problema do caixeiro viajante em famílias**. 2022. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Pesquisa Operacional, Ita/Unifesp, São José dos Campos, 2022.

WANG, Chunan; WANG, Xiaoyu. Airport congestion delays and airline networks. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [S.L.], v. 122, p. 328-349, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.008>.

WANG, Yanjun; CAO, Yakun; ZHU, Chenping; WU, Fan; HU, Minghua; DUONG, Vu; WATKINS, Michael; BARZEL, Baruch; STANLEY, H. Eugene. Universal patterns in passenger flight departure delays. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 10, n. 1. 23 abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-62871-6>.

WANG, Yiyuan; CAI, Shaowei; YIN, Minghao. **New heuristic approaches for maximum balanced biclique problem**. **Information Sciences**, v. 432, p. 362-375, 2018.

XIAO-RONG, Feng; XING-JIE, Feng; RUI, Zhao. Using The Heuristic Genetic Algorithm in Multi-runway Aircraft Landing Scheduling. **Telkomnika Indonesian Journal Of Electrical Engineering**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 2203-2211, 1 mar. 2014. Institute of Advanced Engineering and Science. <http://dx.doi.org/10.11591/telkomnika.v12i3.4488>.

XIE, Haotian; LI, Yi; PU, Yang; ZHANG, Chen; HUANG, Junlin. Evaluating airline service quality through a comprehensive text-mining and multi-criteria decision-making analysis. **Journal Of Air Transport Management**, [S.L.], v. 120, p. 102655, set. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102655>.

YAMAKAMI, Leticia. **Total de passageiros afetados por cancelamentos de voo cresce 104% até julho**: segundo levantamento da airhelp obtido com exclusividade por veja, 3,2 milhões de passageiros teriam direito à indenização pelos transtornos passados. 2024. Disponível em: https://veja.abril.com.br/economia/total-de-passageiros-afetados-por-cancelamentos-de-voo-cresce-104-ate-julho#google_vignette. Acesso em: 30 ago. 2024.

YU, Bin; GUO, Zhen; ASIAN, Sobhan; WANG, Huaizhu; CHEN, Gang. Flight delay prediction for commercial air transport: a deep learning approach. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [S.L.], v. 125, p. 203-221, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.013>.

ZHANG, Junfeng et al. **A New Meta Heuristic Approach for Aircraft Landing Problem**. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, v. 37, n. 02, p. 197-208, 2020.

ZHIXING, Tang; SHAN, Huang; SONGCHEN, Han. Recent Progress about Flight Delay under Complex Network. **Complexity**, [S.L.], v. 2021, n. 1, jan. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1155/2021/5513093>.

ZIPENG, Li; YANYANG, Wang. A Review for Aircraft Landing Problem. **Matec Web Of Conferences**, [S.L.], v. 179, p. 03016, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201817903016>.