

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

PAULO HENRIQUE DE CASTRO ROMANINI

APLICAÇÃO DE MODELOS SEMI-INTEGRADOS DE PROGRAMAÇÃO DE VOOS
E ALOCAÇÃO DE AERONAVES UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Joinville

2022

PAULO HENRIQUE DE CASTRO ROMANINI

APLICAÇÃO DE MODELOS SEMI-INTEGRADOS DE PROGRAMAÇÃO DE VOOS
E ALOCAÇÃO DE AERONAVES UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia de Transportes e Logística do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Eng. Vanina Macowski Durski Silva.

Joinville

2022

PAULO HENRIQUE DE CASTRO ROMANINI

APLICAÇÃO DE MODELOS SEMI-INTEGRADOS DE PROGRAMAÇÃO DE VOOS
E ALOCAÇÃO DE AERONAVES UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 30 de novembro de 2022.

Banca Examinadora:

Dra. Eng. Vanina Macowski Durski Silva
Orientadora/Presidente

Dra. Christiane Wenck Nogueira Fernandes
Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Dra. Silvia Lopes de Sena Tagliarenha
Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

Dedico este trabalho ao meu avô José, que sempre compartilhou comigo a paixão
pela aviação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar em todas as escolhas e oferecer todas as oportunidades que tive em minha vida.

À minha mãe Daniela e minha avó Isabel, por jamais deixarem de acreditar em mim e por estarem comigo em todas as etapas da minha formação. Ao meu pai Ronny, por todo o companheirismo e por sempre me apoiar, à minha madrinha Delma, pela dedicação à minha educação. Leonardo, Keicia, Dyandra, Maria Eduarda, Esther e demais familiares obrigado por serem parte dessa conquista.

À minha namorada Paola, que me deu forças em todos os momentos desta árdua etapa, muito obrigado. Agradeço também à toda sua família por todo o carinho durante todos esses anos.

Ao EFICEM e ESATI, por me apresentarem na prática o que é trabalho em equipe. Agradeço também aos times da Nidec e Embraer, por contribuírem na minha formação profissional.

Às amizades que fiz em Joinville, em especial à Beatriz, Bruno, Damylle, Eduardo, Felipe, Gabriel, Joyce, Luis, Leonardo, Marcelo, Rodrigo e Yasmin, por estarem presentes durante todos esses anos de graduação.

Aos meus amigos Arthur, Daniel, Kauê, Leonardo, Matheus, Pedro, Sergio, Vítor, Walclériston, e seus familiares, por continuarem fazendo parte da minha vida durante todos esses anos.

Por fim, a todos os professores e professoras que contribuíram na minha formação acadêmica, em especial à Prof. Eng. Vanina Macowski Durski Silva por aceitar desenvolver este trabalho comigo, e às Prof. Christiane Wenck Nogueira Fernandes e Silvia Lopes de Sena Taglialha pelos ensinamentos no campo da Pesquisa Operacional.

RESUMO

A Programação de Voos consiste em sequenciar um conjunto de voos a partir de pares Origem-Destino com janelas de operações definidas, escolhidos na etapa anterior de Desenvolvimento de Rotas, enquanto Alocação de Aeronaves consiste em escolher o modelo de aeronave que irá atender cada programação de voos. Tais etapas são as que mais impactam nos custos de uma companhia aérea e, tratar cada uma de forma isolada pode levar a resultados insatisfatórios, seja em alocar um modelo de aeronave incompatível com a demanda da programação de voos, seja não gerar o sequenciamento ideal para cada modelo de aeronave. No entanto, buscar aplicar as duas etapas de forma integrada gera modelos da classe *NP-hard*, aumentando a complexidade computacional e exigindo a utilização de meta-heurísticas. Neste contexto, este trabalho concentrou-se em analisar dois modelos matemáticos relacionados à Programação de Voos e Alocação de Aeronaves, sendo que o primeiro busca minimizar a perda de receitas e o segundo busca minimizar o Momento de Transporte, dado pelo produto entre o número de passageiros não transportados e o tempo de viagem, e, para a busca de solução dos referidos problemas, foi desenvolvido um Algoritmo Genético. Os dados utilizados no estudo são de uma empresa aérea regional. Ao final deste trabalho, são apresentados os resultados operacionais, econômicos, e de robustez das programações de voos geradas por cada modelo.

Palavras-chave: Programação de Voos. Alocação de Aeronaves. Modelos Semi-Integrados. Algoritmo Genético.

ABSTRACT

Flight Scheduling consists of sequencing a set of flights from Origin-Destination pairs with defined operational windows, chosen in the previous Route Development step, while Fleet Assignment consists of choosing the aircraft model that will operate each flight schedule. These steps are the ones that have the most impact on an airline's costs and treating each one separately can lead to unsatisfactory results, either in allocating an aircraft model that is incompatible with the demand of the flight schedule, or not generating the ideal sequencing for each aircraft model. However, seeking to apply the two steps in an integrated manner generates models of the NP-hard class, increasing computational complexity and requiring the use of metaheuristics. In this context, this work focused on analyzing two mathematical models related to Flight Scheduling and Fleet Assignment, where the first seeks to minimize the loss of revenue and the second seeks to minimize the Moment of Transport, given by the product between the number of passengers not transported and the travel time, and a Genetic Algorithm was developed to find a solution of the problems. The data used in the study are from a regional airline. At the end of this work, operational, economic and robustness results are presented for the flight schedules generated by each model.

Keywords: Flight Schedule. Fleet Assignment. Genetic Algorithm. Semi-Integrated Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas do Planejamento das Operações de Voo.....	20
Figura 2 - Ilustração dos Voos, Jornadas e Viagens	24
Figura 3 - Fluxograma do Algoritmo Genético.....	29
Figura 4 - População, Indivíduo e Cromossomo com Codificação Binária.....	30
Figura 5 - Operação de Seleção por Torneio	30
Figura 6 - Operações de Reprodução e Mutação	31
Figura 7 - Substituição de Indivíduos na População	31
Figura 8 - Fluxograma PRISMA Aplicado Neste Trabalho	35
Figura 9 - Representação da Modelagem Espaço-Tempo.....	39
Figura 10 - Mapa da Malha Aérea da Região Nordeste	44
Figura 11 - Mapa da Malha Aérea Principal	45
Figura 12 - Exemplo 1 de Programação de Voos.....	51
Figura 13 - Exemplo 2 de Programação de Voos.....	52
Figura 14 - Exemplo de Indivíduo com Genes Aleatórios e Reprodução	54
Figura 15 - Exemplo de Inclusão e Remoção de um Voo	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados Operacionais para o Modelo Matemático 1	60
Tabela 2 – Resultados Operacionais para o Modelo Matemático 2	61
Tabela 3 – Resultados de Tempo de Voo e em Solo para o Modelo Matemático 1..	63
Tabela 4 – Resultados de Tempo de Voo e em Solo para o Modelo Matemático 2..	64
Tabela 5 – Resultados Econômicos para o Modelo Matemático 1	65
Tabela 6 – Resultados Econômicos para o Modelo Matemático 2	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Etapas, Métodos Empregados e Objetivos Esperados	33
Quadro 2 – Quantidade de Trabalhos Acadêmicos por tipo de Função Objetivo.....	36
Quadro 3 – Quantidade de Trabalhos Acadêmicos por Método de Solução.....	37
Quadro 4 – Conjunto de dados utilizados no Modelo 1	39
Quadro 5 – Parâmetros de entrada utilizados no Modelo 1	40
Quadro 6 – Variáveis de decisão utilizadas no Modelo 1	40
Quadro 7 – Frota da Empresa Aérea Analisada.....	46
Quadro 8 – Frotas Propostas para Alocação de Voos	46
Quadro 9 – Dados dos pares O-D Ofertados	47
Quadro 10 – Opções de Destino para uma mesma Origem e mesmo Horário	48
Quadro 11 – Tabela de Voos do Exemplo 1	51
Quadro 12 – Tabela de Voos do Exemplo 2	52
Quadro 13 – Inclusão de Voo Inicial na Programação de Uma Aeronave	58
Quadro 14 – Comparação entre os Grupos de Aeronaves	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC - *Aircraft*

AG – Algoritmo Genético

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

ASK – *Available Seat-Kilometers*

BELF – *Break-even Load Factor*

O-D – Origem-Destino

MIP – *Mixed Integer Programming*

PRISMA - *Preferred Reporting Items for Systematic Review and MetaAnalysis*

RPK - *Revenue Passenger-Kilometers*

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Penalidade em não voar com um assento vazio
β	Penalidade em não atender um passageiro
δ	Break-even Load Factor
A_f	Quantidade de aeronaves do modelo f disponível
C^f	Número de assentos disponíveis no modelo de aeronave f
D_m	Demanda irrestrita no mercado m
d_{ij}	Número de potenciais passageiros associado ao voo de i para j
F	Conjunto de todos os modelos de aeronaves
L	Conjunto dos arcos que representam movimentos de aeronaves
L_m	Conjunto de arcos associados ao mercado m
L_t	Conjunto de arcos com horário na origem menor ou igual a t , e horário no destino maior que t
L_v	Conjunto de arcos que representam voos
L_{vd}	Conjunto de arcos que representam voos designados a um mercado
M	Conjunto de todos os mercados
N_f	Conjunto de todos os nós para o modelo de aeronave f
N_{ra}	Conjunto de nós com restrição no horário de chegada
N_{rd}	Conjunto de nós com restrição no horário de saída
pa_{ij}	Número de passageiros associados ao voo de i para j
R_{ij}	Receita unitária para um passageiro no voo de i a j
T_{ij}	Tempo de viagem de i a j
x_{ij}^f	Número de aeronaves do modelo f alocado ao arco (i, j)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
1.2. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	17
1.2.1. Justificativa Econômica e Operacional	17
1.2.2. Justificativa Acadêmica	18
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. PLANEJAMENTO DA MALHA AÉREA	20
2.2. ROBUSTEZ NA PROGRAMAÇÃO DE VOOS	24
2.3. MODELOS DE PROGRAMAÇÃO DE VOOS E ALOCAÇÃO DE AERONAVES	25
2.4. META-HEURÍSTICA ALGORITMO GENÉTICO	28
3. METODOLOGIA	33
3.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	34
3.2. DEFINIÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS	37
3.2.1. Modelo Matemático 1	38
3.2.2. Modelo Matemático 2	42
3.3. BUSCA E SELEÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	44
3.3.1. Apresentação da Empresa Aérea	44
3.3.2. Dados Selecionados no Banco de Dados da ANAC	46
3.3.3. Demais Dados de Entrada	49
3.4. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO E SUAS VARIAÇÕES	49
3.4.1. População, Indivíduos, Cromossomos e Aptidão	49
3.4.2. Algoritmo Genético	54
3.4.3. Operações de Inclusão e Exclusão de Voos	55
3.4.4. Populações Válidas	57
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
4.1. RESULTADOS OPERACIONAIS	59
4.1.1. Passageiros Transportados	59

4.1.2. Tempo em Voo e em Solo.....	62
4.2. RESULTADOS ECONÔMICOS	64
4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	66
5. CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS.....	69
APÊNDICE A – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 1 E MODELO 1.....	73
APÊNDICE B – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 2 E MODELO 1.....	75
APÊNDICE C – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 1 E MODELO 2.....	77
APÊNDICE D – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 2 E MODELO 2.....	79
APÊNDICE E – TABELA DOS HORÁRIOS DE VOO ENTRE PARES O-D.....	81
APÊNDICE F – PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO GENÉTICO	83

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O transporte aéreo brasileiro, de maneira geral, é de fundamental no desenvolvimento socioeconômico do Brasil, conectando grandes centros urbanos a regiões isoladas do extenso território nacional, seja por voos diretos ou com conexões. De acordo com dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC 2019a), no ano de 2019 as viagens aéreas foram responsáveis pelo transporte interestadual de 87 milhões de passageiros, frente aos 40 milhões transportados pelo modal rodoviário coletivo.

O planejamento da malha aérea das companhias aéreas envolve diversas etapas, desde a definição de rotas até a atribuição dos tripulantes às viagens. No entanto, a programação dos voos e a alocação de aeronaves são as etapas que mais impactam nas receitas e custos de operações (KHANMIRZA; NAZARAHARI; HAGHBEIGI, 2020).

Buscar soluções para as etapas de forma isolada, pode levar a resultados insatisfatórios (LOHATEPANONT; BARNHART, 2004). O contrário também é inviável, visto que um modelo totalmente integrado é computacionalmente impraticável, dado o número de variáveis do problema (HANE et al., 1995; KLABJAN, 2004).

A programação de voos de uma companhia aérea está restrita a horários específicos nos principais aeroportos, tornando o sequenciamento de voos um processo complexo, exigindo robustez do planejamento, minimizando atrasos em sequência. Já a alocação de aeronaves visa a escolha do modelo de aeronave que melhor atenda a demanda de cada rota, maximizando lucro e minimizando a demanda não atendida, além de assentos não ocupados.

O planejamento aéreo é um processo que busca determinar uma programação de voos que tende a permanecer inalterada para aquela temporada, porém, dada uma demanda incerta, tal programação falha em apresentar a melhor solução que otimize a oferta de assentos (JIANG; BARNHART, 2009; YAN; TANG; FU, 2007).

Observa-se que as empresas aéreas buscam o sequenciamento ideal dos voos, que maximize a taxa de ocupação das aeronaves em operação na malha aérea.

O melhor sequenciamento de voos permite a recaptura de passageiros em seus principais aeroportos de conexão de voos, denominados *hubs*, aumentando a ocupação de determinado voo, a partir de passageiros que chegaram de diferentes localidades, mas com um destino em comum. De 2010 a 2019, enquanto a oferta de assentos teve um aumento de 13,7%, a quantidade de passageiros pagantes no mesmo período subiu em 38% (ANAC, 2019a).

Como é inviável formular um modelo matemático e método de solução que encontre de forma integrada um resultado único para todas as etapas do planejamento da malha aérea, diversos autores propõe modelos semi-integrados de duas ou mais etapas do planejamento e um método de solução para as mesmas. Na literatura, encontra-se modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves, além de métodos de solução tanto por meio de *softwares* gratuitos e pagos, quanto pela implementação de heurísticas e meta-heurísticas em linguagens computacionais como o C++ (WEI et al., 2020; XU; WANDEL; SUN, 2021).

Apesar de serem duas etapas distintas, as que mais impactam nas receitas e custos das operações, diversos estudos apresentam modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves, que resultam em uma programação com o melhor modelo de aeronave disponível na frota, para cada sequência de voos, tendo, principalmente, como objetivo, a maximização da receita ou do lucro e, minimização de custos operacionais ou demanda não atendida (KENAN; JEBALI; DIABAT, 2017; DONG; CHUHANG; LAU, 2016; WANG; LI, 2013).

Neste contexto, pergunta-se se os modelos matemáticos disponíveis na literatura são capazes de gerar uma robusta programação de voos, com a devida frota alocada e se os diferentes modelos matemáticos podem levar a resultados totalmente divergentes nos quesitos operacional e econômico?

Ao final deste trabalho, observou-se que os modelos matemáticos selecionados para encontrar programações de voos e alocação de aeronaves foram capazes de gerar programações válidas para os grupos de aeronaves propostos, minimizando o número de passageiros não transportados, voos não atendidos, e maximizando a receita gerada a cada iteração do Algoritmo Genético implementado.

1.1. OBJETIVOS

Visando testar modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves propostos em trabalhos acadêmicos, e apresentar um método de solução desenvolvido pelo autor, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Determinar programações de voos e alocações de aeronaves que maximizam a receita e minimizam o número de passageiros não atendidos, a partir de um Algoritmo Genético (AG)..

1.1.2. Objetivos Específicos

- Analisar modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves;
- Selecionar modelos semi-integrados com funções objetivo distintas;
- Implementar computacionalmente os modelos utilizando-se do método meta-heurístico de Algoritmo Genético;
- Testar os modelos implementados com dados de uma empresa aérea regional e comparar a programação de voos e aeronaves alocadas, obtidas em cada um dos modelos implementados, quanto ao desempenho econômico e operacional.

1.2. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

1.2.1. Justificativa Econômica e Operacional

A gestão das empresas aéreas é baseada em um intensivo investimento de capital, seja na compra ou arrendamento e manutenção de aeronaves, treinamento de tripulação e operação em solo, ou combustível de aviação, sendo este o mais caro deles (DONG; CHUHANG; LAU, 2016; GÜRKAN; GÜREL; AKTÜRK, 2016). Portanto, a escolha por rotas mais lucrativas, um cronograma que minimize atrasos ou cancelamentos, e a opção por aeronaves mais eficientes é o que garante uma maior margem para o lucro e minimização na utilização dos recursos e despesas operacionais, essencial para a sobrevivência nesse mercado (DONG; CHUHANG; LAU, 2016; GÜRKAN; GÜREL; AKTÜRK, 2016).

Os assentos ofertados podem ser considerados como as mercadorias mais perecíveis do mundo pois, uma vez encerrada a possibilidade de venda, tal produto não somente torna-se uma oportunidade de receita perdida, como também gera de despesa, agregando peso de cada assento vago e não cumprindo sua função (SUBRAMANIAN et al., 1994 apud KENAN; JEBALI; DIABAT, 2017). O principal desafio na oferta de assentos é a alta incerteza de demanda semanas antes ao início das operações planejadas (KENAN; JEBALI; DIABAT, 2017). Assim, com uma demanda indeterminada, os valores das tarifas também ficam comprometidos, sendo necessário reduzir operações em rotas menos lucrativas, ou utilizar aeronaves com menos capacidade e aumento na tarifa (SHERALI; BAE; HAOUARI, 2013 apud KENAN; JEBALI; DIABAT, 2017).

A escolha das rotas e a correta alocação de aeronaves pode ser complexa, onde atribuir uma aeronave com menor capacidade que a demanda gera perda de demanda, porém atribuir uma aeronave com maior capacidade resulta em assentos vagos e custos operacionais mais altos (KENAN; JEBALI; DIABAT, 2017). Deste modo, a programação de voos e alocação de aeronaves são as duas decisões mais importantes das operações, pois contribuem significativamente nos custos e receitas da empresa (SHERALI; BAE; HAOUARI, 2013 apud KENAN; JEBALI; DIABAT, 2017).

Portanto, o desenvolvimento de modelos de programação de voos e alocação de aeronaves, assim como a integração dessas decisões vêm recebendo o maior nível de atenção por parte das companhias aéreas e, este trabalho pode contribuir na busca

de uma análise de integração entre demanda e capacidade que maximize lucro, explorando oportunidades de mitigar atrasos e flexibilidade na reprogramação de voos (XU; WANDELT; SUN, 2021).

1.2.2. Justificativa Acadêmica

O objetivo acadêmico deste trabalho é o estudo do processo de planejamento de malha aérea, compreendendo os modelos matemáticos desenvolvidos sobre o tema de programação de voos e alocação de aeronaves, além da busca e assimilação dos dados necessários pertinentes a cada modelo.

Espera que este trabalho, elaborado por um estudante de Engenharia de Transportes e Logística, contribua não somente na compreensão de modelos matemáticos voltados ao tema de programação de voos e alocação de aeronaves, mas também no desenvolvimento de métodos de solução para gerar resultados viáveis, e agregar conhecimento para futuramente propor um modelo matemático original, com novos parâmetros e uma nova abordagem.

Por fim, espera-se contribuir com a capacidade analítica em interpretar e debater resultados gerados a partir de diferentes modelos aplicados, sendo capaz de tomar decisões operacionais e econômicas, contribuindo para com o acervo bibliográfico a respeito do tema de estudo.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto de 5 capítulos. O Capítulo 1 apresenta o tema de planejamento da malha aérea nas empresas aéreas (e seus estágios de programação de voos e alocação de aeronaves), sua importância e impactos que certos parâmetros não previstos podem causar, visto que se trabalha com uma demanda incerta. Além disso, são apresentados os objetivos buscados neste trabalho e suas justificativas.

O Capítulo 2 aborda os principais estágios do planejamento da malha aérea, além de suas peculiaridades. Também discute o tema da robustez nas operações aéreas e modelos matemáticos já existentes na literatura, sobre programação de voos e alocação de aeronaves. Por fim, busca-se explicar o Algoritmo Genético, método escolhido para encontrar as soluções dos modelos matemáticos aplicados neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para realizar o levantamento bibliográfico, PRISMA, assim como o processo de escolha dos modelos matemáticos, a serem adotados para realizar o estudo de programação de voos e alocação de aeronaves. Também são listados os dados de entrada utilizados para os modelos de programação de voos e alocação de aeronaves, extraídos dos bancos de dados da ANAC (ANAC, 2022a). Neste capítulo detalham-se também os modelos matemáticos escolhidos para programação de voos e alocação de aeronaves.

Já no Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos após a execução do Algoritmo Genético para cada modelo matemático escolhido para encontrar as programações de voo e alocação de aeronaves. São feitas análises referentes aos resultados de tempo de execução das operações do Algoritmo Genético, resultados operacionais referentes à quantidade de passageiros transportados e voos operados, tempos de voo e em solo, e resultados econômicos, como receita total e perda, tarifa média por voo e por passageiro.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões feitas após a implementação do Algoritmo Genético para cada modelo matemático escolhido, a discussão a respeito dos dados utilizados, e sugestões para futuros trabalhos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordadas as etapas que definem o planejamento das operações de voos nas empresas aéreas e trabalhos recentes relacionados a modelos integrados de programação de voos e alocação de aeronaves.

2.1. PLANEJAMENTO DA MALHA AÉREA

O problema tradicional do planejamento da malha aérea é normalmente dividido em quatro ou mais subetapas (Figura 1), resolvidos de forma sequencial, visto que o modelo único é da classe *NP-Hard* (HANE et al., 1995; KLABJAN, 2004).

Figura 1 – Etapas do Planejamento das Operações de Voo



Fonte: Autoria própria (2022).

O *Desenvolvimento de Rotas*, primeira etapa do planejamento das operações de voo, consiste no desenvolvimento das rotas entre pares origem-destino (O-D). A análise da viabilidade de se implementar uma nova rota é feita considerando parâmetros de rentabilidade, demanda, recursos internos e marketing, sendo esse último uma ação estratégica da empresa para ocupar o *marketshare* de uma rota ou região, frente a seus concorrentes (GÜRKAN; GÜREL; AKTÜRK, 2016; LOHATEPANONT; BARNHART, 2004).

Barnhart, Belobaba e Odoni (2003) e Gopalakrishnan e Johnson (2005) não consideram esse subproblema como parte do planejamento, visto que diversas áreas da empresa são envolvidas nas decisões, não limitando a escolha de operações apenas a parâmetros de demanda. Já Caetano e Gualda (2017) referem-se a esse subproblema como Geração de Voos, que fazem parte de um subgrupo maior denominado Definição de Voos.

Escolhidas as rotas entre pares O-D incorporadas à malha aérea, é iniciado o desenvolvimento da *Programação de Voos* (BARNHART; BELOBABA; ODoni, 2003). A escolha dos horários e frequência de atendimento dependem dos *slots* disponíveis para cada empresa aérea, em cada aeroporto específico (CAETANO, 2011; YAN; TANG; FU, 2007).

Coordenado pela ANAC, os *slots* são o direito a pouso ou decolagem de uma aeronave em um horário específico, com o objetivo de organizar as movimentações aeroportuárias, principalmente em aeroportos saturados ou próximos à capacidade máxima (ANAC, 2022b).

Devido às inúmeras combinações de horários de pouso e decolagem possíveis, se reutiliza a tabela de horários já existente, aproveitando também os *slots* já acordados com a ANAC, sem alterar substancialmente a tabela de horários anterior (KLABJAN, 2004; LOHATEPANONT; BARNHART, 2004).

Lohatepanont e Barnhart (2004) dividem o desenvolvimento do cronograma (*schedule development*) em planejamento da frequência de voos (*frequency planning*) para cada par de cidades, e desenvolvimento da tabela de horários (*timetable development*) para pousos e decolagens em cada aeroporto.

De modo geral, as programações de voo são criadas para ocorrerem de forma cíclica, seja um ciclo diário para voos domésticos, ou um ciclo semanal para operações internacionais, simplificando o sequenciamento de voos e planejamento das manutenções (CAETANO, 2011; KLABJAN, 2004). Normalmente, a programação de voos domésticos possui uma sequência diária, sendo a preferência das companhias aéreas, pois minimizam complicações operacionais (DONG; CHUHANG; LAU, 2016).

Após a definição dos horários de atendimento dos voos em cada par OD, assim como a frequência de operações e demanda prevista, é realizada a *Alocação de Aeronaves*, ou seja, o modelo ideal para cada voo. De modo a otimizar as operações, a alocação depende da composição da frota de cada companhia aérea, da quantidade de cada modelo, do número de assentos e máxima distância que cada aeronave pode percorrer (CAETANO; GUALDA, 2017; GÜRKAN et al., 2016). Outros fatores também podem ser considerados, como custo de combustível, existência de serviços de manutenção no aeroporto de chegada ou destino e disponibilidade de portões de embarque (HANE et al., 1995).

A alocação está restrita ao tamanho da frota, ou seja, a quantidade de aeronaves alocadas no planejamento não deve ser maior que a quantidade disponível e, para cada voo, apenas uma aeronave deve ser alocada (BARNHART; BELOBABA; ODoni, 2003; CAETANO; GUALDA, 2017; HANE et al., 1995). A conservação do fluxo garante que a quantidade de aeronaves que chegam ou se encontram em determinado aeroporto seja a mesma que a de aeronaves partem ou permanecem no aeroporto em um período posterior, garantindo a não existência de fontes e sorvedouros (RABETANETY, 2006).

Barnhart, Belobaba e Odoni (2003) abordam a alocação de aeronaves como um problema de minimização de custos, sendo esses compostos pelos custos operacionais e custos na perda de demanda de passageiros. O primeiro está relacionado à parâmetros de performance de cada aeronave, como consumo de combustível e custos de manutenção. Já o segundo refere-se à perda de receita quando uma demanda deixa de ser atendida devido à aeronave alocada àquele voo encontrar-se totalmente ocupada.

Klabjan (2004) busca a minimização do custo de alocação de determinada aeronave para cada voo e a maximização do lucro, contabilizando o valor da tarifa aérea e a quantidade de passageiros alocados para cada itinerário. Na maioria dos casos, o objetivo da alocação de aeronaves será a maximização do lucro, sendo a minimização utilizada apenas em casos que a demanda atendida independa do modelo de aeronave utilizada (ABARA, 1989 apud CAETANO, 2011).

A *Roteirização das Aeronaves* é realizada para cada uma das aeronaves da frota, onde a matrícula (*tail number*) é atribuída a cada sequência de voos, denominados trilhos (*strings*). Tal sequência deve respeitar os períodos de manutenção obrigatória para cada modelo, principalmente manutenções de rotina, realizadas em intervalos pré-determinados, normalmente no período noturno, em aeroportos com estrutura para prestar o serviço (CAETANO, 2011; KLABJAN, 2004).

De forma sequencial, o aeroporto de destino de um voo deve coincidir com o aeroporto de origem do voo seguinte, e o período entre um pouso e a decolagem posterior deve ser equivalente ao tempo de *turnaround* (tempo de permanência em solo). Uma característica dos trilhos é que a sequência ocorre de forma cíclica (ver Figura 2), com início e fim em um mesmo aeroporto, sendo o local onde as manutenções programadas costumam ocorrer. Portanto, o tempo do ciclo deve

coincidir com o período em que a aeronave estará certificada a operar, com sua manutenção em dia (KLABJAN, 2004).

O objetivo da *Alocação de Tripulantes* é designar a tripulação qualificada a cada um dos voos, de modo a minimizar custos e maximizar parâmetros relacionados à jornada de trabalho de cada tripulante, respeitando as leis de trabalho para esse grupo (GOMES; GUALDA, 2011; KLABJAN, 2004).

Sendo o segundo maior custo de operações de uma companhia aérea, atrás apenas dos custos de combustível, essa subetapa requer extrema atenção dos planejadores. Porém, devido às incontáveis restrições e variáveis associadas ao problema, heurísticas ou meta-heurísticas costumam ser empregadas para a solução do problema (BARNHART; BELOBABA; ODONI, 2003; GOMES; GUALDA, 2011).

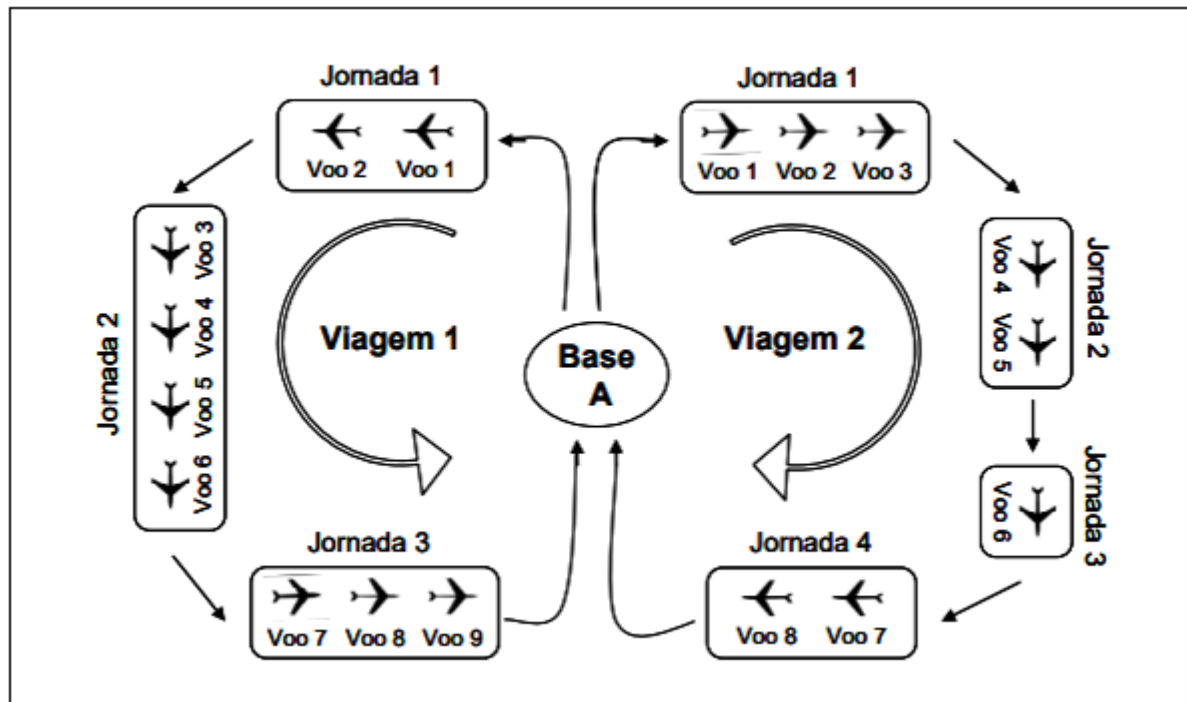
Barnhart, Belobaba e Odoni (2003), Klabjan (2004) e Gomes e Gualda (2011) separam a Alocação de Tripulantes em dois subproblemas. Os últimos referem-se a tais problemas como Problema de Determinação das Viagens e Problema de Atribuição das Escalas.

O Problema de Determinação das Viagens (*Crew Pairing Problem*) tem como principal objetivo determinar as viagens, ou conjunto de jornadas, que atenda a todos os voos definidos na fase de Programação de Voos, de forma análoga à Alocação de Frota (GOMES, 2009).

A jornada é a sequência de voos a ser seguida, onde o aeroporto de destino deve coincidir com o aeroporto de origem do voo seguinte, com o objetivo de minimizar custos, encontrando subconjuntos de jornadas, para um cronograma de múltiplos dias (BARNHART; BELOBABA; ODONI, 2003; KLABJAN, 2004).

Presente na Lei 13.475, de 28 de agosto de 2017, a viagem de cada tripulante compreende a uma ou mais jornadas. A viagem de cada tripulante se inicia em sua base domiciliar (*crew base*), definido em contrato (BRASIL, 2017). O tripulante pode, então, ter uma série de jornadas ao longo dos dias, não necessariamente encerrando o dia na cidade onde mora, desde que o período distante de sua base não ultrapasse 6 dias, e que se tenha um descanso mínimo de 12 horas entre duas jornadas consecutivas (BRASIL, 2017; GOMES; GUALDA, 2011). A Figura 2 ilustra as sequências de voos, jornadas e viagens explicadas anteriormente.

Figura 2 - Ilustração dos Voos, Jornadas e Viagens



Fonte: Gualda (2009).

A *Atribuição das Escalas* é feita a cada tripulante, seja tripulante de voo (Comandante e Primeiro Oficial) ou tripulante de cabine (Comissários de Bordo), dados requisitos legais como sobreaviso, folgas e férias, e requisitos técnicos relacionados à certificação de operação de cada modelo de aeronave (GOMES, 2009; KLABJAN, 2004).

A satisfação dos tripulantes também é considerada, sendo definida por questões hierárquicas, onde tripulantes de maior senioridade podem exigir preferências de horários, dias ou rotas. Nesses casos, o objetivo é combinar o máximo de preferências possíveis, de modo a minimizar custos potenciais (BARNHART; BELOBABA; ODONI, 2003; KLABJAN, 2004).

2.2. ROBUSTEZ NA PROGRAMAÇÃO DE VOOS

A robustez é uma técnica preventiva de prejuízos financeiros relacionados a atrasos em uma ou mais etapas da operação (CACCHIANI, SALAZAR-GONZÁLES, 2016). Uma tabela de voos robusta é aquela que evita, ou minimiza, a propagação de atrasos ao máximo (CACCHIANI; SALAZAR-GONZÁLES, 2016; MARLA; VAZE; BARNHART, 2018).

Tal propagação pode ser gerada com um pequeno atraso em um dos vários estágios da programação de voos, seja por parte de atraso na chegada da aeronave, na realização da manutenção ou troca da tripulação entre voos, gerando um atraso em cadeia em todas as rotas subsequentes (CACCHIANI; SALAZAR-GONZÁLES, 2016; MARLA; VAZE; BARNHART, 2018).

A discrepância entre o custo planejado e o custo real, com influências do atraso propagado, fez com que os planejadores incluíssem, na maximização dos lucros, considerações sobre custos de eventos não previstos (DUNBAR; FROYLAND; WU, 2012). Logo, a robustez pode ser alcançada inserindo um tempo extra em cada fase de operação da jornada de voos, além de minimizar a troca de tripulações para um mesmo avião, e vice-versa (CACCHIANI; SALAZAR-GONZÁLES, 2016).

2.3. MODELOS DE PROGRAMAÇÃO DE VOOS E ALOCAÇÃO DE AERONAVES

Como é praticamente impossível encontrar uma programação de voos otimizada de forma única, o problema é subdividido em etapas interligadas, onde o resultado de uma etapa (como por exemplo o Desenvolvimento de Rotas) é o parâmetro de entrada da próxima (como por exemplo a Programação de Voos) (LOHATEPANONT; BARNHART, 2004; PAPADAKOS, 2007). Por exemplo, o modelo da aeronave alocada servirá de parâmetro para a escolha da tripulação treinada para operar a mesma na etapa seguinte.

No entanto, apesar dessa sequência exigir uma menor capacidade computacional, a solução final pode não ser a ótima global, ou até mesmo levar a resultados inviáveis. Nesse caso, uma possível abordagem é a aplicação de modelos semi-integrados, como a de programação de voos e alocação de aeronaves, melhorando consideravelmente as soluções subótimas do sistema (PAPADAKOS, 2007).

Rexing, Barnhart e Kniker (2000) e Ahuja et al. (2004) utilizam a abordagem de janela de horários para realizar a programação de voos, sendo que a alocação das aeronaves é feita anteriormente. No primeiro trabalho é utilizado o método branch-and-bound e, no segundo, uma solução de procura do vizinho mais próximo é implementada em linguagem C++.

A prática de iniciar a programação de voos a partir de um histórico já existente é abordada por Lohatepanont e Barnhart (2004), classificando voos mandatórios e

opcionais, considerando taxas de recaptura, dados históricos e funções de correção de demanda, composição e tamanho da frota. O objetivo do modelo é a minimização do custo operacional, receita perdida pelo não atendimento subtraído da receita da demanda recapturada, e variações de receita inerentes a mudanças no mercado.

Solucionada por meio de uma heurística múltipla da colônia de formigas, Caetano e Gualda (2011a) buscam a minimização das perdas de receita por não atendimento da demanda. Diferente dos seus outros trabalhos (2011b, 2017), as receitas são apresentadas de forma explícita, ou seja, a variável de tarifa por voo é considerada na função objetivo.

Pita, Barnhart e Antunes (2013) abordam um modelo que considera congestionamentos em aeroportos com restrições de *slots*. A função objetivo maximiza as receitas, minimiza custos de operação, de demanda perdida, custos de atraso por parte da aeronave e do passageiro.

Para a alocação de aeronaves em uma rede espaço-tempo, Wang e Li (2013) propõem três modelos. O primeiro é um modelo básico de minimização dos custos operacionais. No segundo modelo, uma janela de horários é imposta, adicionando cópias de arcos de voos, com os devidos intervalos de tempo. O último modelo permite a flexibilidade das janelas, possibilitando uma programação de voos ajustável.

Dong, Chuhang e Lau (2016) utilizam dois modelos de programação inteira mista, o primeiro com o objetivo de encontrar, de forma integrada, a programação de voos e alocação de aeronaves, minimizando os custos operacionais subtraídos da receita. O segundo modelo considera valores discretos para as tarifas de cada voo, correspondendo a um conjunto de valores para cada itinerário, e uma variável binária caso tal valor tenha sido selecionado. A solução é obtida por meio de uma heurística de relaxação e decomposição em combinações de itinerários.

A concorrência com outras companhias aéreas no modelo de programação de voos é abordada por Abdelghany, Abdelghany e Azadian (2017), considerando a captura da demanda em função da atratividade na oferta dos horários. Um algoritmo genético é implementado, selecionando indivíduos que maximizem o lucro.

O Momento de Transporte é tratado por Caetano e Gualda (2011b, 2017), minimizando o número de assentos não ocupados e demanda não atendida para cada trecho, sem ser necessário considerar os custos e tarifas. Em Caetano e Gualda (2011b), os autores realizam a análise da robustez na aplicação do momento do

transporte para a escolha de aeronaves, voos de reposicionamento e conflitos de *slots*.

Dada demanda incerta, Kenan, Jebali e Diabat (2017) buscam a maximização do lucro, analisando amostras de um número limitado de cenários, fornecendo uma aproximação da solução ótima de forma iterativa.

Um algoritmo genético mestre-escravo foi implementado por Khanmirza, Nazarahari e Haghbeigi (2020), com recaptura de demanda, para problemas de grande escala. A função objetivo tem como característica a minimização dos custos de operação e perda de demanda. O algoritmo mestre buscou a programação de voos e alocação de aeronaves, enquanto o algoritmo escravo resolveu o problema de ajuste do fluxo de passageiros.

Wei et al. (2020) definem duas funções objetivo, sendo a primeira a minimização de custos fixos e variáveis de operação e perda por tempo desperdiçado em solo, e a maximização da quantidade de passageiros transportados para todos os voos na segunda. Para encontrar a solução, o algoritmo Colônia de Formigas em dois estágios foi implementado, sendo o primeiro estágio a alocação de todos os voos à frota disponível, satisfazendo o problema de forma local. No segundo estágio, uma tabela de voos é gerada, maximizando o lucro de todos os voos.

No trabalho de Xu, Wandelt e Sun (2021), a propagação de atrasos na programação de voos é considerada, com a possibilidade de reprogramação, recaptura de passageiros, outras ofertas de voo e desconexões de passageiros. O modelo de maximização do lucro é resolvido por dois métodos, geração de colunas e busca do vizinho mais próximo.

Nesta Seção foi apresentada uma revisão sistemática da literatura, com exemplos de trabalhos que abordam o tema de modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves, alguns abordando também a etapa de roteirização de aeronaves (JAMILI; 2016; ABDELGHANY; ABDELGHANY; AZADIAN, 2017; WEI et al., 2020; XU; WANDELT; SUN, 2021).

Nos modelos de minimização, a função objetivo teve como foco principal a busca de redução dos custos operacionais e receita perdida. No entanto, modelos para a perda de demanda atendida também foram abordados (CAETANO; GUALDA, 2011b; CAETANO; GUALDA, 2017). Já os modelos de maximização tiveram por objetivo otimizar receitas e lucros, porém permitindo também obter passageiros

transportados ou rotação de voos (ABDELGHANY; ABDELGHANY; AZADIAN, 2017; WEI et al., 2020).

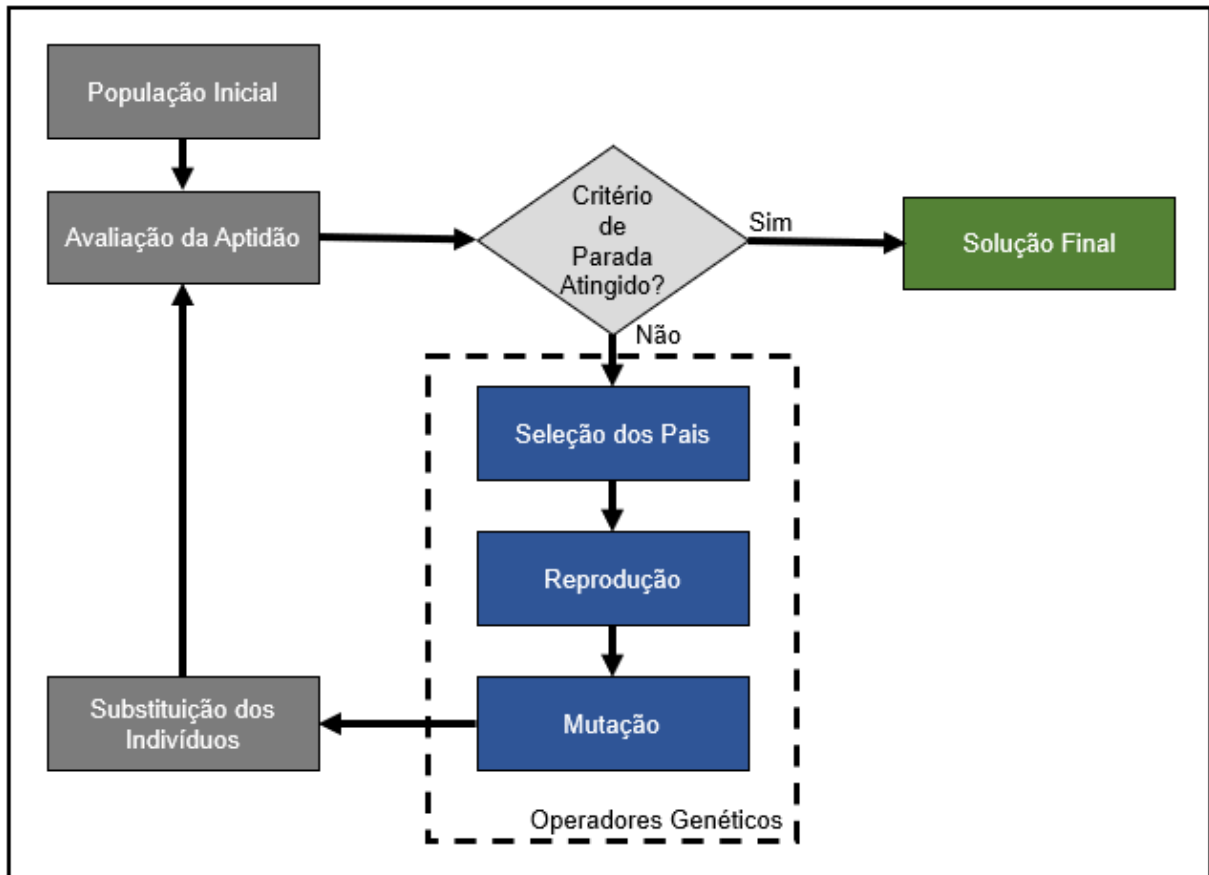
Por conseguinte, a revisão sistemática permitiu conhecer diferentes modelos matemáticos de programação de voos e alocação de aeronaves presentes na literatura, com suas funções objetivo e restrições, citados anteriormente, além de identificar os métodos de solução dos modelos matemáticos. Dentre os métodos, foram utilizadas heurísticas como *branch-and-bound* e geração de colunas foram utilizadas (AHUJA et al. 2004; DONG; CHUHANG; LAU, 2016; LOHATEPANONT; BARNHART, 2004; REXING; BARNHART; KNIKER, 2000; XU; WANDEL; SUN, 2021). Já os métodos de busca meta-heurísticos foram implementados utilizando Algoritmo Genético ou Algoritmo de Colônia de Formigas (ABDELGHANY; ABDELGHANY; AZADIAN, 2017; CAETANO; GUALDA, 2011b; KHANMIRZA; NAZARAHARI; HAGHBEIGI, 2020; WEI et al., 2020).

2.4. META-HEURÍSTICA ALGORITMO GENÉTICO

O Algoritmo Genético, introduzida por Holland (1975), é uma técnica de otimização baseada na Teoria da Evolução das Espécies. Essa meta-heurística analisa iterativamente uma população, ou conjunto de indivíduos. Cada um desses indivíduos representa uma solução do problema analisado, sendo codificado pela sua característica genética, denominada cromossomo.

As informações contidas em cada cromossomo podem representar dados binários, reais, ou até mesmo símbolos, a depender do projeto aplicado. Os indivíduos são analisados quanto à sua medida de desempenho (aptidão) e, a partir das operações de reprodução, geração de novos descendentes e, em alguns casos, mutação, o Algoritmo Genético encontra o indivíduo com a melhor aptidão. Na Figura 3 está ilustrado o fluxograma do Algoritmo Genético.

Figura 3 - Fluxograma do Algoritmo Genético

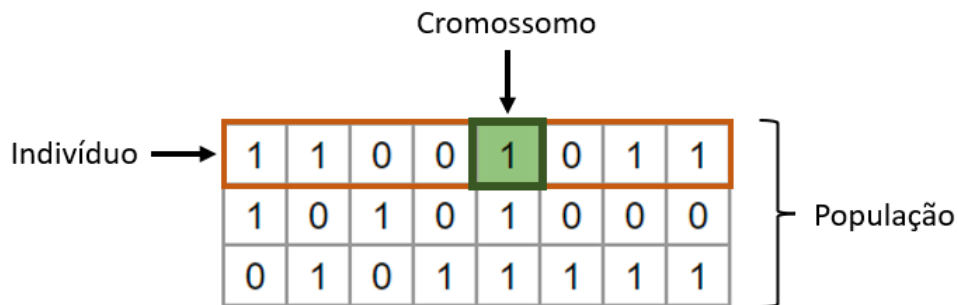


Fonte: Autoria própria (2022).

A analogia entre o Algoritmo Genético e a Teoria da Evolução Natural pode ser descrita a seguir:

- a) Uma população inicial aleatória e válida é gerada, respeitando as restrições do modelo matemático aplicado. Essa população contém um número definido de indivíduos, com mesma quantidade de cromossomos. Na Figura 4 são apresentados os cromossomos, indivíduos e população em codificação binária;

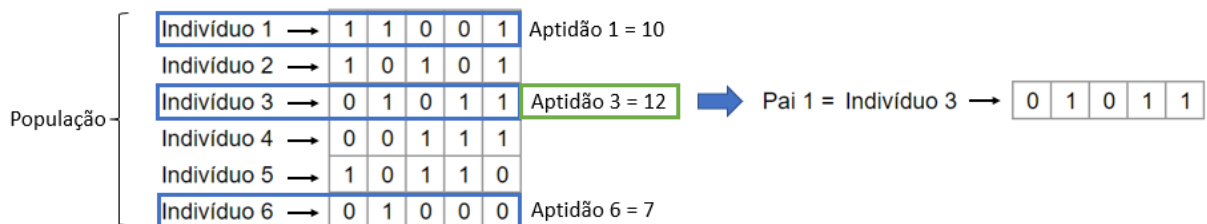
Figura 4 - População, Indivíduo e Cromossomo com Codificação Binária



Fonte: Autoria própria (2022).

- b) A seleção dos pais pode ser feita por diversas formas, sendo as mais conhecidas a seleção por roleta e a seleção por torneio, sendo essa última a escolhida na implementação do AG. Na seleção por torneio, n indivíduos são aleatoriamente escolhidos e suas aptidões comparadas, sendo selecionado o de melhor aptidão. Na Figura 5, três indivíduos foram selecionados de forma aleatória, sendo escolhido o Indivíduo 3, de maior aptidão;

Figura 5 - Operação de Seleção por Torneio

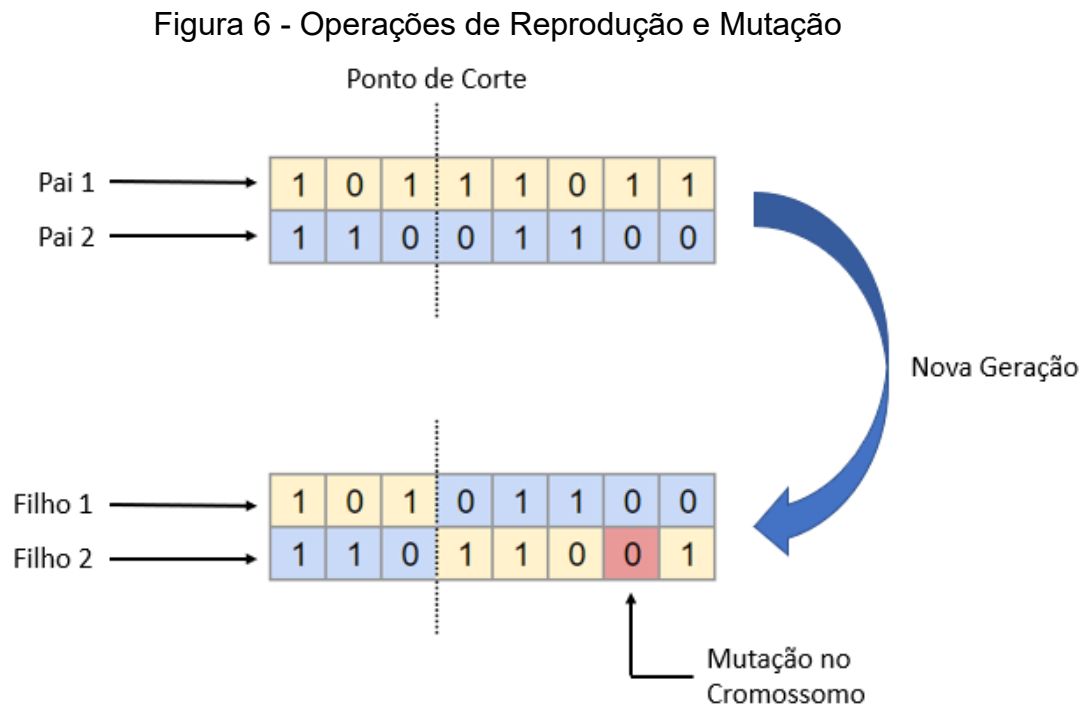


Fonte: Autoria própria (2022).

- c) A aptidão, no Algoritmo Genético, é definida pela função objetivo do modelo matemático proposto. Tal aptidão pode penalizar indivíduos que violem restrições do modelo matemático;
- d) Os indivíduos candidatos são escolhidos em pares para a reprodução. Neste processo ocorre o *crossover*, ou seja, a troca de informações dos cromossomos de cada pai, gerando dois novos indivíduos. Os novos indivíduos irão então ser diferentes de seus pais, porém com

características de ambos. Neste trabalho, é realizado um corte único no vetor de cada pai, sendo o ponto de corte escolhido de forma aleatória;

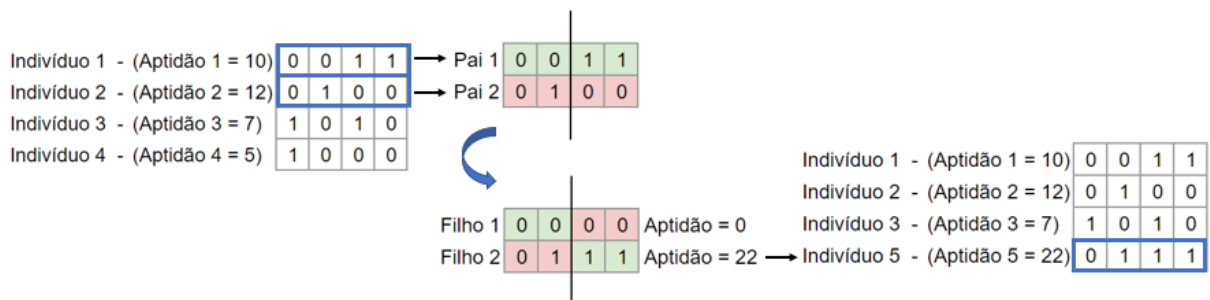
- e) Para os novos filhos, ocorre a probabilidade mutação em um de seus cromossomos, escolhido aleatoriamente. Em codificação binária, um cromossomo com valor 0 irá assumir o valor 1, e vice-versa. Na Figura 6 são apresentadas as operações de reprodução e mutação;



Fonte: Autoria própria (2022).

- f) Os novos filhos gerados irão então substituir os piores indivíduos da população, gerando uma nova para a próxima iteração, conforme Figura 7;

Figura 7 - Substituição de Indivíduos na População



Fonte: Autoria própria (2022).

- g) O Algoritmo Genético é encerrado assim que atinge um critério de parada, seja tempo de execução, número de gerações ou valor de aptidão para a população.

O problema de Programação de Voos e Alocação de Aeronaves pode resultar em diversos sequenciamentos de voos diferentes para uma mesma aeronave, com receitas e custos semelhantes, principalmente, sendo um problema da classe *NP-hard*. Portanto, a utilização de meta-heurísticas, como o Algoritmo Genético, é indicada para tais problemas com múltiplas soluções ótimas locais (ABDELGHANY; ABDELGHANY; AZADIAN, 2017). De forma iterativa, o método é capaz de encontrar diversas soluções viáveis, e até mesmo combiná-las para encontrar uma solução ainda melhor.

Neste capítulo, foram apresentadas as etapas de planejamento da malha aérea (Desenvolvimento de Rotas, Programação de Voos, Alocação de Frota, Roteirização de Aeronaves e Alocação de Tripulantes), a Robustez na programação de voos, além dos diferentes trabalhos acadêmicos disponíveis na literatura que abordam a Programação de Voos e Alocação de Aeronaves, assim como o método do Algoritmo Genético, utilizado para encontrar soluções problema apresentado.

No capítulo a seguir é apresentada a metodologia utilizada para escolha dos modelos matemáticos a serem utilizados para a modelagem do problema de programação de voos e alocação de aeronaves, os dados utilizados e suas fontes, as funções objetivo, restrições, conjuntos de dados, parâmetros de entrada e variáveis de decisão, e posterior implementação do AG.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no decorrer deste estudo é apresentada no Quadro 1, onde são descritos os objetivos esperados em cada fase.

Quadro 1 – Etapas, Métodos Empregados e Objetivos Esperados

Fases	Métodos Empregados	Objetivos Esperados
Revisão Sistemática da Literatura	Método PRISMA	1. Analisar modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves;
Definição dos Modelos de Programação de Voos e Alocação de Aeronaves	Seleção com base no PRISMA e Dados disponíveis	2. Selecionar dois modelos semi-integrados com funções-objetivo distintas, de acordo com o método PRISMA e dados disponibilizados pela ANAC, além de critérios do autor;
Busca e Seleção dos Dados de Entrada	Banco de Dados da ANAC	3. Dados abertos disponíveis no acervo do site da ANAC;
Implementação do Algoritmo Genético	Linguagem Python	4. Implementar computacionalmente os modelos utilizando-se do método meta-heurístico de Algoritmo Genético, em linguagem Python;
Análise dos Resultados	Apresentação dos Resultados Operacionais, Econômicos e de Robustez	5. Analisar os resultados obtidos após a execução do AG para cada modelo escolhido, nos quesitos operacionais, econômicos e de robustez.

Fonte: Autoria própria (2022).

A seguir, estão descritas as fases expostas no Quadro 1:

- a) Revisão Sistemática da Literatura: A primeira fase tem como objetivo buscar na literatura a definição das etapas do Planejamento da Malha Aérea e analisar os diferentes modelos de programação de voos e alocação de aeronaves propostos em diferentes trabalhos acadêmicos. Os artigos para análise foram selecionados por meio do método *Preferred Reporting Items for Systematic Review and MetaAnalysis*, referido como PRISMA 2020 (Page et al., 2021), descrito na Seção 3.1. Ao final dessa fase, um conjunto de artigos foi selecionado, de acordo com critérios pré-definidos, para a escolha dos modelos matemáticos utilizados neste trabalho;

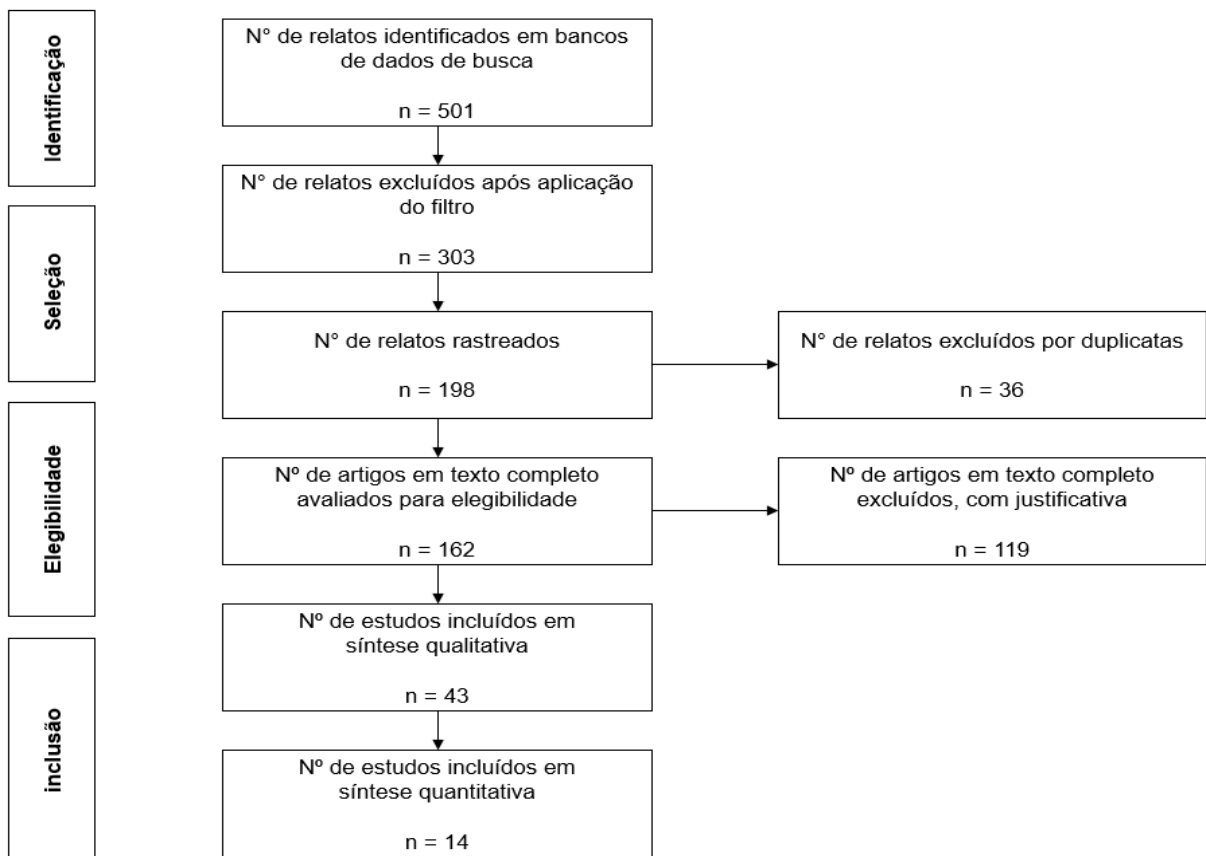
- b) Escolha dos Modelos: Após a aplicação do método PRISMA e seleção dos artigos elegíveis, novos critérios apresentados na Seção 3.2 foram formulados, para auxiliar na escolha de dois modelos finais para o desenvolvimento do Algoritmo Genético. Os modelos matemáticos selecionados diferem nos parâmetros utilizados na função objetivo, descritos na Seção 3.2;
- c) Busca e Seleção dos Dados de Entrada: Todos os dados utilizados como parâmetro de entrada para os modelos matemáticos foram extraídos das bases de dados disponibilizados pela ANAC, em seu site. Foram selecionados aqueles pertinentes a todos os modelos analisados na Revisão Sistemática da Literatura;
- d) Desenvolvimento Computacional e Aplicação dos Métodos: Com a escolha dos dois modelos matemáticos para a programação de voos e alocação de aeronaves, foi implementado, em linguagem Python, um Algoritmo Genético para cada modelo matemático, com mesma construção, mas divergente na aptidão (Função Objetivo). Os dados de entrada para gerar os *outputs* de cada modelo são disponibilizados pela ANAC, para livre acesso (ANAC, 2022a);
- e) Análise dos Resultados: Apresentação dos resultados obtidos após a execução do AG para cada modelo matemático selecionado, nos quesitos econômico (como receita gerada, tarifa média por voo e por passageiro), operacional (quantidade de passageiros transportados, número de assentos vagos), de robustez (tempo em solo e tempo em voo) e demais tempos de execução do AG.

3.1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A pesquisa sobre modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves, foi realizada no portal de periódicos CAPES, para o período de 2000 a 2022, tanto no idioma inglês quanto no português, ordenados por relevância, utilizando as palavras-chave *Airline Scheduling*, *Flight Scheduling*, *Fleet Assignment*, *Aircraft Routing* e *Malha Aérea*, essa com o objetivo de selecionar trabalhos de autores brasileiros. Para a realização de tal busca, empregou-se o método PRISMA, que auxilia na organização do relato das revisões sistemáticas e

meta-análise (GOMES et al., 2021). Considerando as palavras-chave acima citadas, foram inicialmente selecionados 198 de um total de 501 trabalhos dos bancos de dados. Após a exclusão de 36 trabalhos duplicados, restaram 162 para análise de elegibilidade. A Figura 8 representa o fluxograma PRISMA adotado para seleção dos trabalhos acadêmicos.

Figura 8 - Fluxograma PRISMA Aplicado Neste Trabalho



Fonte: Autoria própria (2022).

Buscando eleger os artigos para leitura, foram selecionados os 162 que tratam exclusivamente do tema, para uma ou mais etapas do problema de Programação de Voos e Alocação de Aeronaves, seja para busca de soluções robustas ou de recuperação da programação, independentemente do método de solução utilizado.

Tendo em vista que o proposto tema deseja aplicar modelos semi-integrados de programação de voos e alocação de aeronaves, utilizando dados disponibilizado pela ANAC em seu site (ANAC, 2022a), para a análise qualitativa, selecionaram-se aqueles que seguem as seguintes afirmações:

- a) Abordam apenas as etapas de Programação de Voos, Alocação de Aeronaves, ou a combinação dessas com a Roteirização de Aeronaves, sem considerar as demais etapas do Planejamento da Malha Aérea;
- b) Os modelos propostos buscam determinar as programações em um período anterior ao início das operações;
- c) Os dados necessários para os modelos matemáticos de cada trabalho acadêmico podem ser encontrados nos dados disponibilizados pela ANAC (ANAC, 2022a).

Por fim, para os 14 trabalhos selecionados para essa etapa, foram analisados os principais parâmetros considerados na função objetivo dos modelos e o Quadro 2 apresenta os diferentes propósitos e a representatividade dos mesmos.

Quadro 2 – Quantidade de Trabalhos Acadêmicos por tipo de Função Objetivo

Função Objetivo	Maximização	Minimização
Receita	12,5%	
Lucro	8,3%	
Rotação de Voos	4,2%	
Passageiros Transportados	4,2%	
Custos Operacionais		29,2%
Demanda Perdida		8,3%
Tempo em Solo		8,3%
Receita Perdida		8,3%
Momento de Transporte		8,3%
Tempo de Operação		4,2%
Atrasos		4,2%

Fonte: Autoria própria (2022).

Os métodos de solução adotados pelos autores encontrados no levantamento bibliográfico incluem a Busca de Vizinhança Variável (*Variable Neighborhood Search*, ou VNS), Geração de Colunas e Linhas, *Branch-and-Bound*, Algoritmos Genéticos e utilizando métodos exatos de MIP (*Mixed Integer Programming*, ou Programação

Inteira Mista), por meio de softwares como o Gurobi e CPLEX. No Quadro 3 é apresentada a representatividade de trabalhos encontrados por método de solução.

Quadro 3 – Quantidade de Trabalhos Acadêmicos por Método de Solução

Método de Solução	Quantidade de Trabalhos
Algoritmo do Vizinheiro mais Próximo	18,75%
<i>Branch-and-Bound</i>	12,50%
Geração de Colunas e Linhas	12,50%
Algoritmo de Particionamento	6,25%
Algoritmo de Colônia de Formigas	12,50%
Algoritmo Genético	12,50%
MIP - Exato	25,00%

Fonte: Autoria própria (2022).

3.2. DEFINIÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Este trabalho propõe a aplicação dos modelos matemáticos desenvolvidos por Caetano e Gualda (2011a; 2017), onde os autores buscam definir programação de voos e alocação de aeronaves que minimize a perda de receita, pelo não atendimento da demanda, e o Momento de Transporte, respectivamente. A escolha pelos modelos de tais autores se deve aos seguintes critérios:

- Os autores apresentam diferentes modelos para o mesmo tema de estudo proposto nesse trabalho;
- Existência de outros trabalhos dos referidos autores corroboram para o estudo dos modelos selecionados (CAETANO; GUALDA, 2011a; CAETANO, 2011);
- Os conjuntos de dados e parâmetros de entrada necessários para os modelos dos autores podem ser obtidos nos bancos de dados da ANAC;
- Os referidos autores utilizam meta-heurística de Colônia de Formigas para a solução do tema de programação de voos e alocação de aeronaves (CAETANO; GUALDA, 2017). Este critério indica que, para o modelo matemático apresentado pelos autores, meta-heurísticas podem ser utilizadas, dada complexidade do problema a ser resolvido.

Ambos os modelos matemáticos foram utilizados para encontrar programações de voos para uma empresa aérea regional brasileira, de mesma complexidade que o presente trabalho. Nos dois trabalhos acadêmicos, foram utilizadas três distribuições de demanda, e diferentes grupos de aeronaves para a frota. Caetano e Gualda (2011a) utilizaram a meta-heurística Colônia de Formigas para gerar as programações de voos para as diferentes demandas e grupos de aeronaves propostos, já Caetano e Gualda (2017) utilizam a versão 7 do *software Gurobi Optimizer*.

Diferente dos métodos de solução propostos por Caetano e Gualda (2011a; 2017), neste trabalho propõe-se um Algoritmo Genético próprio, sendo implementados dois AGs idênticos, porém com diferentes aptidões (Caetano e Gualda; 2011a; 2017).

Nas seções a seguir são apresentados os modelos matemáticos de Caetano e Gualda (2011a; 2017), assim como as variáveis de decisão, parâmetros de entrada e conjunto de dados propostos por tais autores, que serão utilizados para a criação e execução do AG.

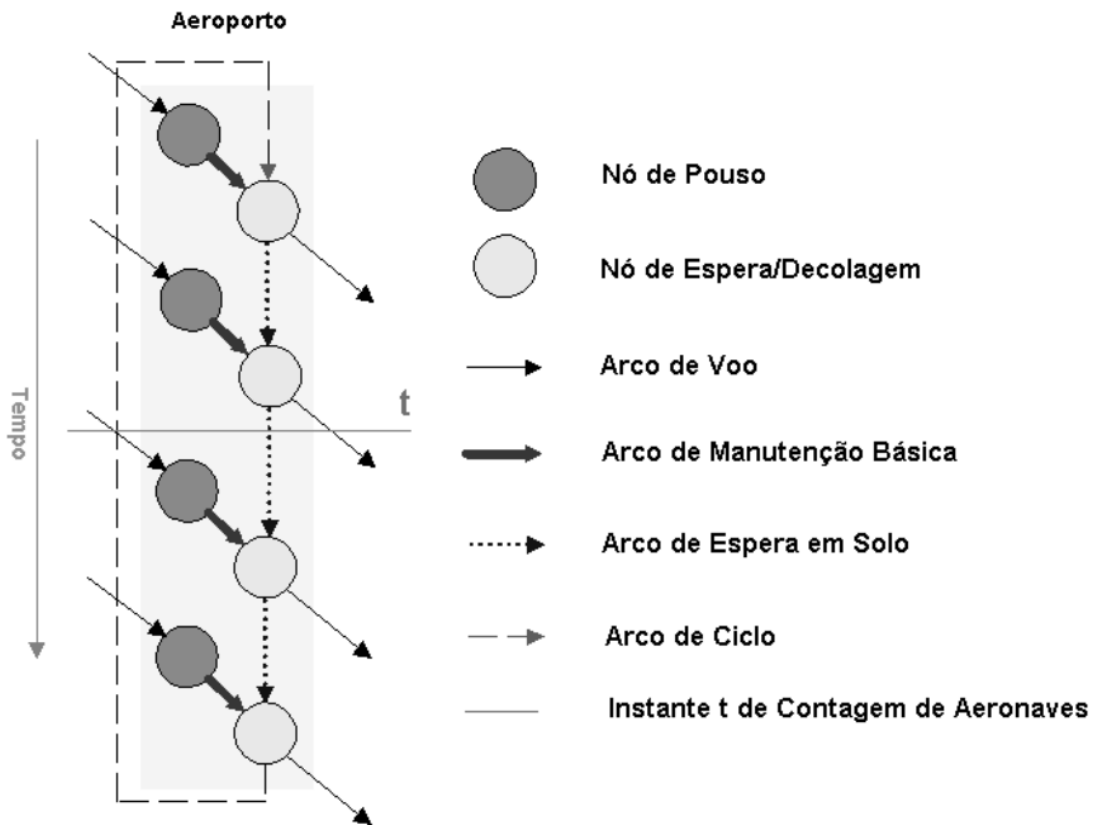
3.2.1. Modelo Matemático 1

O modelo matemático de Caetano e Gualda (2011a) busca minimizar a receita perdida ao realizar voos com assentos vagos, assim como o não atendimento de uma possível demanda. Diferente dos outros modelos tradicionais, este permite que nem todos os voos propostos na etapa anterior (Programação de Voos) sejam atendidos.

A fim de representar as restrições horárias de movimentação nos aeroportos, foi utilizado o conceito da modelagem espaço-tempo, proposto por Berge e Hopperstead (1993 *apud* SHERALI *et al. apud* CAETANO; GUALDA, 2011a). Tal modelagem representa todos os movimentos possíveis que um modelo de aeronave pode executar em um aeroporto ao longo do tempo, sejam eles pouso, decolagem, tempo em solo para operações padrão (como embarque, desembarque, abastecimento etc.).

A Figura 9 apresenta o conceito da modelagem espaço-tempo, onde os nós representam determinado aeroporto no instante de tempo t , e os arcos representam os possíveis movimentos que a aeronave pode executar.

Figura 9 - Representação da Modelagem Espaço-Tempo



Fonte: Caetano e Gualda (2011b).

Para a função objetivo e suas restrições, são definidos os seguintes conjuntos de dados, parâmetros de entrada e variáveis de decisão (Quadro 4, Quadro 5 e Quadro 6, respectivamente). Todas as variáveis de decisão e parâmetros de entrada pertencem a um ou mais conjuntos de dados a seguir:

Quadro 4 – Conjunto de dados utilizados no Modelo 1

M:	Conjunto de todos os mercados, indexados por <i>m</i> . Tais mercados definem uma demanda e uma janela de horário entre um par O-D, limitando a operação a no máximo 1 voo.
N _f :	Conjunto de todos os nós para o modelo de aeronave <i>f</i> , indexado por <i>i</i> , <i>j</i> , <i>o</i> , <i>d</i> ou <i>k</i> , representando o aeroporto em um horário específico.
N _{rd} :	Conjunto de nós com restrição no horário de saída (<i>slot</i> de decolagem).
N _{ra} :	Conjunto de nós com restrição no horário de chegada (<i>slot</i> de pouso).
F:	Conjunto de todos os modelos de aeronaves, indexados por <i>f</i> .
L:	Conjunto dos arcos que representam movimentos de aeronaves, tanto no ar quanto em solo, indexados por (<i>i</i> , <i>j</i>), sendo <i>i</i> o nó fonte e <i>j</i> o nó de destino.
L _v :	Conjunto de arcos que representam voos.
L _{vd} :	Conjunto de arcos que representam voos designados a um mercado.

L_t :	Conjunto de arcos cujo horário na origem é menor ou igual a t , e o horário no destino é maior que t , sendo t um horário específico no período de operações da programação de voos.
L_m :	Conjunto de arcos associados ao mercado m .

Fonte: Caetano e Gualda (2011a).

Quadro 5 – Parâmetros de entrada utilizados no Modelo 1

D_m :	Demanda irrestrita no mercado m .
C^f :	Número de assentos disponíveis no modelo de aeronave f .
R_{ij} :	Receita unitária para um passageiro no voo de i a j . Como (i, j) representa um voo específico para dia e horário, cada voo pode ser associado a uma receita específica.
A_f :	Quantidade de aeronaves do modelo f disponível.

Fonte: Caetano e Gualda (2011a).

Quadro 6 – Variáveis de decisão utilizadas no Modelo 1

x_{ij}^f :	Número de aeronaves do modelo f alocado ao arco (i, j) .
pa_{ij} :	Número de passageiros associados ao voo de i para j .
d_{ij} :	Número de potenciais passageiros (demanda) associado ao voo de i para j .

Fonte: Caetano e Gualda (2011a).

A seguir são apresentadas a Função Objetivo e restrições quem compõe o Modelo Matemático 1 de Caetano e Gualda (2011a):

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in L_v} \left\{ \left[\left(\sum_{f \in F} R_{ij} \cdot C^f \cdot x_{ij}^f \right) - R_{ij} \cdot pa_{ij} \right] + [R_{ij} \cdot (d_{ij} - pa_{ij})] \right\} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{f \in F} x_{ij}^f \leq 1 \quad \forall (i, j) \in L_{vd} \quad (2)$$

$$\sum_{o|(o,k) \in L} x_{ok}^f - \sum_{d|(k,d) \in L} x_{kd}^f = 0 \quad \forall k \in N_f, \forall f \in F \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in L_t} x_{ij}^f \leq A_f \quad \forall f \in F \quad (4)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{d|(i,d) \in L_v} x_{id}^f \leq 1 \quad \forall i \in N_{rd} \quad (5)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{o|(o,j) \in Lv} x_{oj}^f \leq 1 \quad \forall j \in Nra \quad (6)$$

$$\sum_{f \in F} C^f \cdot x_{ij}^f - pa_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in Lv \quad (7)$$

$$d_{ij} - pa_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in Lv \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j) \in Lm} d_{ij} - D_m = 0 \quad \forall m \in M \quad (9)$$

Sendo as variáveis de decisão:

- Binárias:

$$x_{ij}^f \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in Lvd, \forall f \in F \quad (10)$$

- Inteiras:

$$x_{ij}^f \geq 0 \quad \forall (i,j) \in L \setminus Lvd, \forall f \in F \quad (11)$$

$$d_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in Lv \quad (12)$$

$$pa_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in Lv \quad (13)$$

O primeiro termo da função objetivo (1) define a diferença entre a receita máxima que pode ser gerada pelo voo de i para j , e a real receita obtida pelo voo após a alocação de determinado modelo de aeronave. Já o segundo termo define a receita perdida ao não atender a demanda total (ao não operar o voo de i para j) ou parcial (alocar uma aeronave de menor capacidade que a demanda) de determinado voo de i para j .

A restrição (2), de cobertura, determina que no máximo 1 voo pode ser alocado a determinado mercado (voo de i para j no horário específico t). A restrição (3), de balanço, garante a não criação de novas fontes e sumidouros, tornando a programação cíclica, sendo que o aeroporto de origem de determinado voo deve coincidir com o aeroporto de destino do voo anterior, para uma mesma aeronave. Já na restrição (4), não será utilizada uma quantidade maior de aeronaves do modelo f além da informada que existe na frota F .

A restrição (5) garante que o *slot* de horário de partida de determinado aeroporto será alocado a apenas 1 voo, restringindo que mais voos decolem no mesmo horário de partida, no mesmo aeroporto. De forma análoga, porém para os

slots de horário de chegada, a restrição (6) garante que apenas 1 voo seja alocado a essa janela de operações em um mesmo aeroporto.

A restrição (7) faz com que a quantidade de passageiros atendidos no voo de i para j não seja maior que a capacidade do modelo de aeronave alocado ao trecho. Restrições (8) e (9) limitam a quantidade de passageiros atendida pelo voo de i para j e do mercado m aos seus respectivos valores de demanda.

Sobre as variáveis de decisão, a expressão (10) determina que a quantidade de aeronaves da frota F alocada ao voo de i para j não deve ser maior que 1, restringindo as operações a apenas 1 voo para cada par O-D, sendo igual a 1 caso a aeronave do modelo f seja alocada ao voo de i para j , e 0 caso contrário.

Já a expressão (11) determina que não existem restrições no número de aeronaves da frota F em solo entre quaisquer horários de chegada e partida, em um mesmo aeroporto, desde que o número não seja negativo. Como a restrição é apenas para quando as aeronaves estão em solo, tal expressão é válida apenas para os arcos que não representam voos, excluindo os arcos que representam voos alocados a cada mercado. As expressões (12) e (13) especificam que, tanto a quantidade de passageiros transportados quanto sua demanda devem ser valores maiores ou iguais a 0.

3.2.2. Modelo Matemático 2

O segundo modelo matemático escolhido para aplicação neste trabalho foi proposto por Caetano e Gualda (2017). Este é uma variação do modelo apresentado por Caetano e Gualda (2011a), onde se utiliza o conceito de Momento de Transporte, não considerando o valor de receita unitária em sua função objetivo, visto que tal valor não é realístico em diversos casos.

De fato, ao determinar uma programação futura de voos considerando dados do passado, há chances de que os voos escolhidos para operação não serem os mais lucrativos, devido a, por exemplo, decréscimo na demanda do trecho, aumento no custo do combustível e demais tarifas em determinados aeroportos, entre outros.

Para o novo modelo, os autores Caetano e Gualda (2017) buscam minimizar o Momento de Transporte (produto entre número de passageiros transportados e tempo de viagem, entre o trecho de i para j). Para tal, é necessário definir o *break-even*, ou ponto de equilíbrio, na ocupação de cada aeronave. O *break-even* é dado a

partir do *Load Factor* da aeronave, ou taxa de ocupação (razão entre quantidade de assentos ocupados pela quantidade de assentos oferecidos). A partir disso, empresas aéreas costumam utilizar o *break-even load fator* (BELF), que é a razão de ocupação que torna um voo atrativo para elas.

Para encontrar o valor do BELF (definido por δ), utiliza-se a razão apresentada na Equação (14). A lógica por trás do BELF se dá pela relação entre a penalidade em voar com um assento vazio (oferta maior que a demanda, definida por α) e a penalidade em não atender um passageiro (demanda maior que a oferta, definida por β).

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (14)$$

Caso α e β tenham o mesmo peso, o BELF assume o valor de 50%. Se for considerado que a penalidade de voar com um assento vazio é mais significativo que não atender um passageiro, o BELF será maior que 50%. É importante ressaltar que o valor de BELF não representa a ocupação desejada pela empresa aérea, mas sim a referência média de ocupação de cada voo, visto que, para um BELF muito elevado, o modelo tentará sempre buscar atender voos de altos valores de *Load Factor*, e ignorar voos com menor *Load Factor* mas com uma tarifa maior e, possivelmente, mais lucrativa (CAETANO; GUALDA, 2017).

Neste modelo, apenas a função objetivo foi modificada, introduzindo também o parâmetro de entrada T_{ij} , representando o tempo de viagem entre a origem i e o destino j , com sua Função Objetivo apresentada a seguir:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in L_v} \left\{ T_{ij} \cdot \left[\alpha \cdot \left(\left(\sum_{f \in F} C^f \cdot x_{ij}^f \right) - p a_{ij} \right) + [\beta \cdot (d_{ij} - p a_{ij})] \right] \right\} \quad (15)$$

O fator α multiplica a diferença entre o Momento de Transporte Potencial e Efetivo, e o fator β multiplica o Momento de Transporte Efetivamente Perdido. As demais restrições, assim como variáveis de decisão, parâmetros de entrada e conjunto de dados são os mesmos definidos na Seção 3.2.1.

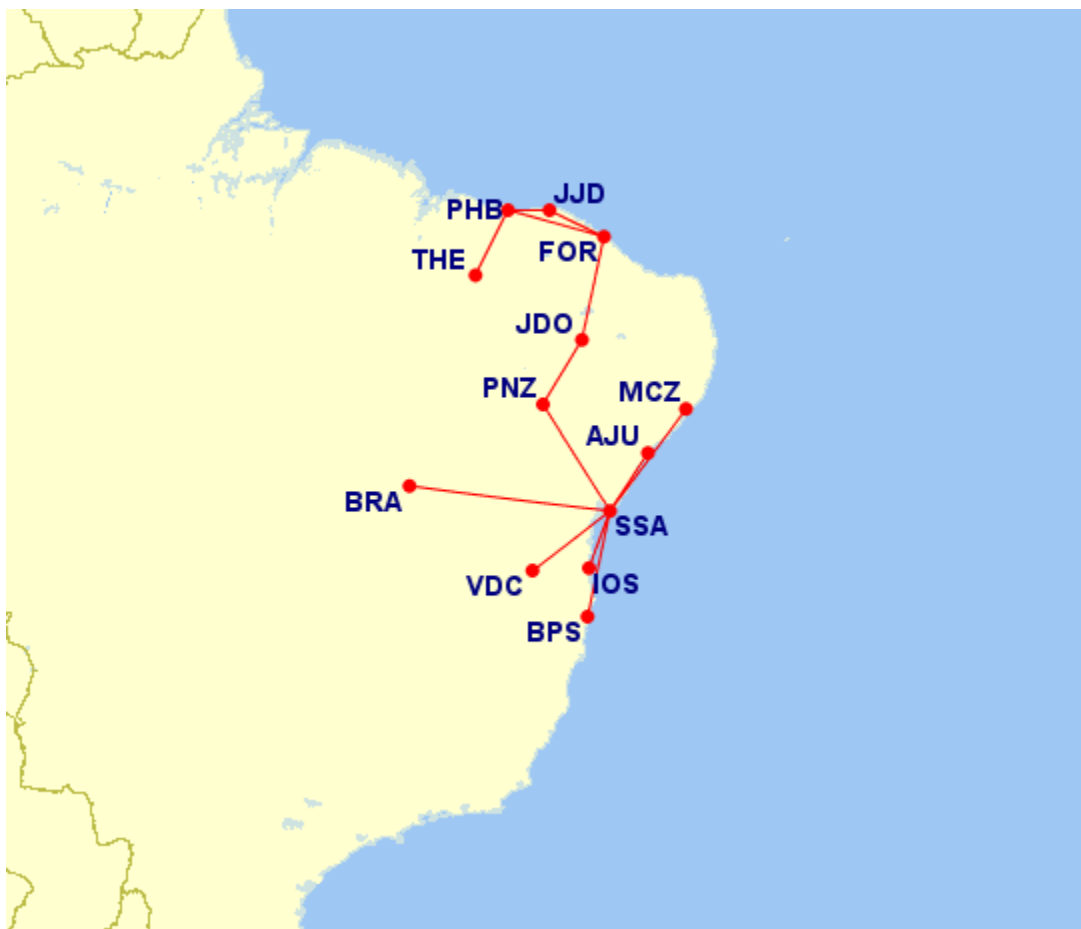
3.3. BUSCA E SELEÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Nesta seção é apresentada a empresa aérea escolhida como exemplo de aplicação do AG e todos os dados de entrada extraídos da base de dados da ANAC, utilizados para os dois modelos matemáticos definidos anteriormente.

3.3.1. Apresentação da Empresa Aérea

A empresa aérea regional selecionada para aplicação do AG, a partir dos modelos propostos na seção 3.2., opera em duas malhas aéreas distintas, em todas as regiões do Brasil. A primeira malha aérea operada pela empresa aérea regional atende 13 cidades e 13 rotas da região Nordeste, tendo como principais cidades Fortaleza e Salvador, conforme Figura 10.

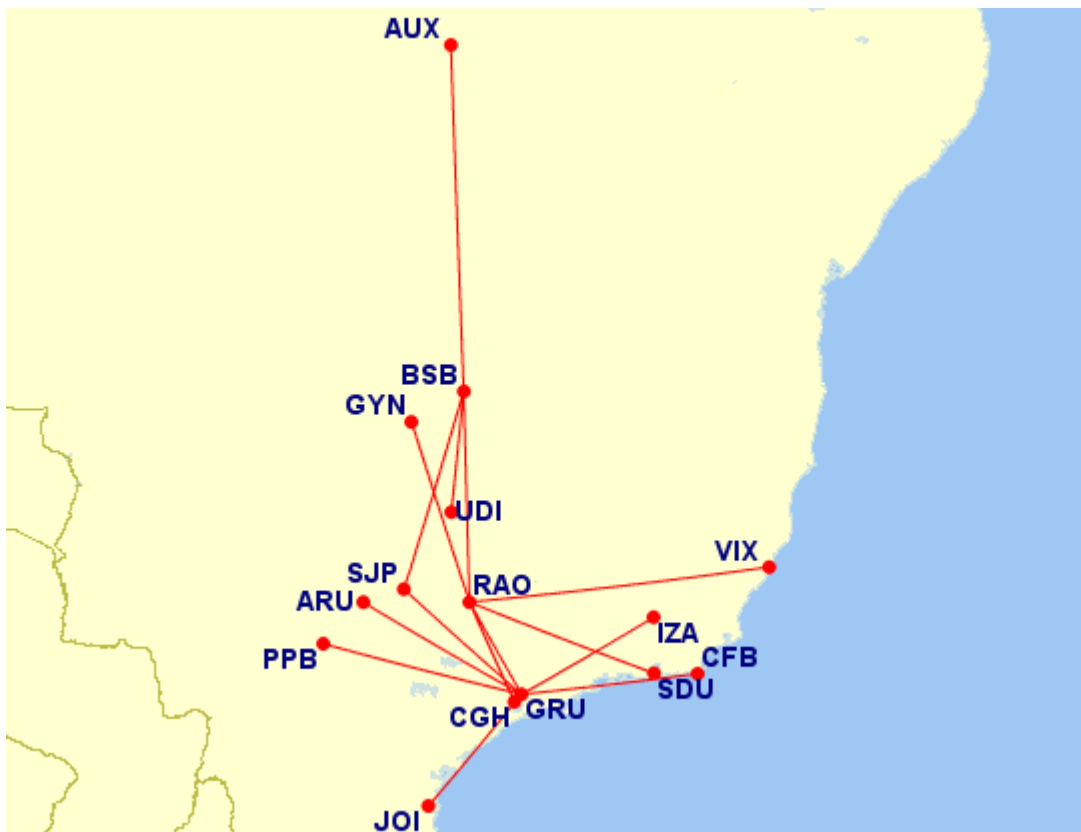
Figura 10 - Mapa da Malha Aérea da Região Nordeste



Fonte: site GreatCircleMap (2022).

A segunda e principal malha aérea operada pela empresa aérea atende 15 destinos e 30 rotas entre as regiões Sudeste e Centro-Oeste, além de 1 destino no Sul e outro no Norte do país, tendo Ribeirão Preto como seu principal *hub*, conforme apresentado na Figura 11. Observa-se que as malhas aéreas apresentadas nas Figuras 10 e 11 não são conectadas, sendo tratadas como malhas aéreas distintas.

Figura 11 - Mapa da Malha Aérea Principal



Fonte: site GreatCircleMap (2022).

Neste trabalho, apenas a malha aérea apresentada na Figura 11, que atende as regiões Sudeste e Centro-Oeste do país, além de 1 destino no Sul e outro no Norte, foi considerada para execução do AG desenvolvido pelo autor, utilizando os modelos matemáticos de Caetano e Gualda (2011a; 2017) apresentados na Seção 3.2.

A empresa aérea possui uma frota composta por 9 aeronaves do modelo ATR-72 em diferentes configurações de assentos, conforme Quadro 7, para atender as duas malhas aéreas apresentadas anteriormente, nas Figuras 10 e 11. Como apenas a malha aérea da Figura 11 foi considerada, somente sua respectiva Tabela de Voos (disponibilizada no Apêndice E) foi utilizada na execução do AG.

Quadro 7 – Frota da Empresa Aérea Analisada

Modelo	Quantidade	N° de Assentos
ATR 72 – 500	2	68
ATR 72 – 500	3	72
ATR 72 – 500	4	74

Fonte: PlaneSpotters (2022).

Não foi possível determinar quais das aeronaves da frota operam em cada uma das malhas aéreas apresentadas nas Figuras 9 e 10. Logo, de modo a contribuir para as análises operacional e econômica das programações de voos geradas por cada modelo matemático, o autor deste trabalho propõe dois grupos de aeronaves para execução do AG, para cada modelo.

O Grupo 1 consiste nas aeronaves com menor número de assentos da frota (duas aeronaves de 68 assentos, e três de 72 assentos), e o Grupo 2 representa as aeronaves de maior número de assentos da frota (quatro de 74 assentos e uma de 72 assentos), apresentados no Quadro 8. Portanto, o AG foi executado para cada modelo, e para cada grupo de aeronaves de forma distinta, totalizando 4 execuções.

Quadro 8 – Frotas Propostas para Alocação de Voos

Grupo 1		Grupo 2	
Identificador	N° de Assentos	Identificador	N° de Assentos
AC 0	68	AC 5	72
AC 1	68	AC 6	74
AC 2	72	AC 7	74
AC 3	72	AC 8	74
AC 4	72	AC 9	74

Fonte: Autoria própria (2022).

3.3.2. Dados Selecionados no Banco de Dados da ANAC

A ANAC é uma agência reguladora federal, criada para regular e fiscalizar operações relacionadas a aviação civil, seja privada ou comercial, além das operações aeroportuárias dos aeroportos brasileiros (SANTOS, 2019). A agência mantém bases de dados das operações aeroviárias e aeroportuárias em seu site, para livre acesso, as quais foram utilizadas na seção *Voos e Operações Aéreas*.

Para determinar a programação de voos e alocação de passageiros para cada aeronave, se faz necessário ter os horários de cada voo, a sua demanda de

passageiros e valor de tarifa para a malha aérea selecionada, conforme conjunto de dados e parâmetros de entrada dos modelos matemáticos definidos na seção 3.2.

O Quadro 9 apresenta todos os pares O-D, a quantidade de voos ofertada para cada par, o percentual de ocupação médio das aeronaves, dada pela razão entre o RPK (*Revenue Passenger-Kilometers* ou Passageiros-Quilômetros Pagos transportados) e ASK (*Available Seat-Kilometers* ou Assentos-Quilômetros Oferecidos), e a média da demanda e tarifa de cada trecho, referentes aos dados retirados do banco de dados da ANAC (ANAC, 2022a) para o mês de janeiro de 2022, utilizados como dados e parâmetros de entrada para os modelos matemáticos.

Quadro 9 – Dados dos pares O-D Ofertados

Origem	Destino	Qtd. De Voos	Demanda Média	$\frac{RPK}{ASK}$	Tarifa Média (R\$)
Araçatuba	São Paulo (GRU)	1	64	71%	311,24
Araguaína	Brasília	1	52	58%	824,58
Brasília	Araguaína	1	55	61%	988,65
Brasília	Ribeirão Preto	1	78	86%	425,68
Brasília	São José do Rio Preto	1	66	74%	348,27
Brasília	Uberlândia	1	72	80%	301,29
Cabo Frio	São Paulo (GRU)	3	54	60%	636,73
Goianá	São Paulo (GRU)	1	50	55%	327,60
Goiânia	Ribeirão Preto	1	62	69%	388,65
Joinville	São Paulo (GRU)	1	64	71%	319,84
Presidente Prudente	São Paulo (GRU)	2	65	72%	291,48
Ribeirão Preto	Brasília	1	65	72%	397,66
Ribeirão Preto	Goiânia	1	63	70%	348,94
Ribeirão Preto	Rio de Janeiro (SDU)	5	71	79%	487,77
Ribeirão Preto	São Paulo (CGH)	6	64	71%	524,30
Ribeirão Preto	São Paulo (GRU)	3	72	80%	232,23
Ribeirão Preto	Vitória	1	38	42%	778,72
Rio de Janeiro (SDU)	Ribeirão Preto	5	75	83%	693,44
São José do Rio Preto	Brasília	1	70	78%	349,01
São José do Rio Preto	São Paulo (GRU)	2	73	81%	247,81
São Paulo (CGH)	Ribeirão Preto	6	69	77%	533,80
São Paulo (GRU)	Araçatuba	1	52	58%	331,46
São Paulo (GRU)	Cabo Frio	3	38	42%	548,29
São Paulo (GRU)	Goianá	1	39	43%	315,60
São Paulo (GRU)	Joinville	1	65	72%	305,98
São Paulo (GRU)	Presidente Prudente	2	60	67%	268,49
São Paulo (GRU)	Ribeirão Preto	3	66	74%	258,09
São Paulo (GRU)	São José do Rio Preto	2	66	73%	247,86
Uberlândia	Brasília	1	74	82%	314,06
Vitória	Ribeirão Preto	1	85	94%	847,99

Fonte: adaptado de ANAC (2022a).

A Demanda Média (d_{ij}) de cada voo foi estimada pelo percentual de ocupação de cada aeronave, calculada pela razão entre o RPK e o APK multiplicada pela média de assentos das aeronaves da frota. Como o resultado da razão entre o RPK e o APK dará o percentual médio de ocupação de cada aeronave, para cada par O-D, a multiplicação pela quantidade de assentos de uma aeronave resultará na quantidade de passageiros transportados em cada voo.

Para as Tarifas Médias (R_{ij}), os dados obtidos no banco de dados da ANAC apresentam diferentes valores para cada mercado, para diferentes quantidades de assentos comercializados. Neste caso, aplicou-se a tarifa média de cada par O-D. Vale destacar que a quantidade de assentos divulgados corresponde a aproximadamente 50% do movimento total de passageiros em cada mercado, pois não são contemplados os que adquiriram a passagem por programas de milhagem, ou grupos com benefícios específicos.

Conforme restrições 5 e 6 apresentadas na subseção 3.2.1., os aeroportos com *slots* restritos a 1 pouso e 1 decolagem, para cada janela de operação são os aeroportos de São Paulo (GRU), São Paulo (CGH), Brasília e Rio de Janeiro (SDU). Os demais aeroportos podem ter mais de um voo partindo ou chegando em uma mesma janela de operação.

A tabela contendo todos os 60 voos potenciais, para todos os pares O-D, está disponibilizada no Apêndice E. As programações de voos das aeronaves não necessariamente devem atender todos os voos potenciais apresentados na tabela de voos, ainda mais por conta das restrições 5 e 6, apresentadas na subseção 3.2.1., como é o caso abaixo, no Quadro 10, retirado do Apêndice E. Neste, o aeroporto de Guarulhos apresenta apenas um *slot* de horário de partida para às 08:45, e 4 possibilidades de destino. Como apenas 1 voo pode ser alocado ao determinado *slot* de horário de decolagem das 08:45, conforme explicado na Seção 2.1., os demais não podem ser operados.

Quadro 10 – Opções de Destino para uma mesma Origem e mesmo Horário

Origem	Horário de Partida	Destino	Horário de Chegada
São Paulo (GRU)	08:25	Ribeirão Preto	09:40
São Paulo (GRU)	08:25	Araçatuba	10:05
São Paulo (GRU)	08:25	Cabo Frio	10:05
São Paulo (GRU)	08:25	São José do Rio Preto	10:05

Fonte: Autoria própria (2022).

O desenvolvimento da tabela de potenciais voos é feita na etapa *Desenvolvimento de Rotas*, anterior à *Programação de Voos*, onde as empresas apresentam todas as possíveis rotas a serem atendidas, considerando apenas os *slots* de partida e de chegada disponíveis para cada aeroporto.

3.3.3. Demais Dados de Entrada

Diferentes autores propõem tempos em solo distintos para voos nacionais. Abdelghany, Abdelghany e Azadian (2017) utilizam 20 minutos como tempo mínimo em solo, já Xu, Wandelt e Sun (2021) adotam 30 minutos, independente da aeronave. Caetano e Gualda (2017) utilizam 15 minutos como tempo mínimo em solo para aeronaves do modelo ATR, no entanto, esse tempo não condiz com a prática das operações de voos desta e das demais companhias aéreas brasileiras que utilizam esse modelo de aeronave. Portanto, neste trabalho foi sugerido o tempo mínimo em solo de 30 minutos.

Para a aplicação do Modelo 2, os valores de α e β foram definidos a partir da referência média de ocupação (BELF, representado por δ). Para definir a referência média de ocupação, calculou-se a média de todas as razões entre *RPK* e *ASK* dos pares O-D do Quadro 9, encontrando o valor de 70%. Aplicando o valor de δ na Equação 16 a seguir, foram encontrados os valores de α e β .

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\delta}{1 - \delta} = \frac{0,7}{1 - 0,7} = \frac{7}{3} \quad (16)$$

3.4. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO E SUAS VARIAÇÕES

Para a implementação de um AG para os modelos matemáticos apresentados na Seção 3.2, foi utilizada a linguagem *Python*, no ambiente de desenvolvimento de código aberto *Spyder*, com seu Pseudocódigo apresentado no Apêndice F.

3.4.1. População, Indivíduos, Cromossomos e Aptidão

O Algoritmo Genético é executado em uma população de F indivíduos, cada um representando a programação de voos diária de cada uma das aeronaves da frota (f), conforme restrição 4 dos modelos matemáticos. Como neste trabalho foi proposta

a utilização de um grupo de 5 aeronaves, o tamanho da população é de 5 indivíduos. A programação de cada aeronave é representada por uma matriz de tamanho $N \times N$, sendo N a quantidade total voos de origem e seus respectivos horários de saída. Neste trabalho, cada matriz possui tamanho 60×60 , conforme número de voos da tabela de voos no Apêndice E.

Em cada programação, o cromossomo do AG é a linha da matriz do indivíduo, sendo cada linha o aeroporto de origem em um horário de partida específico, e cada coluna o aeroporto de destino em seu horário de chegada específico. As linhas da matriz estão em ordem crescente em relação ao horário de partida de cada aeroporto.

Para cada gene do cromossomo, o alelo binário representa se determinado voo de i para j , nos horários específicos, foi alocado ou não à aeronave f (x_{ij}^f), sendo igual a 1 ou 0, respectivamente. Caso o alelo tenha valor 1 para um voo inexistente (voo de i para j não pertence qualquer mercado), nada é alterado na aptidão e programação de voos, sendo indiferente seu valor na matriz.

Isso ocorre, pois, o AG verifica para cada gene da posição j , do cromossomo i e programação da aeronave f , se o voo de i para j pertencer ao conjunto de voos designados ao mercado m (x_{ij}^f), ou seja, se o voo partindo de i em seu respectivo horário de saída e chegando em j no seu respectivo horário de chegada fazem parte do mercado m e possuem demanda, conforme apresentado na Seção 3.2. Caso contrário, o AG não considera o gene de i para j do cálculo de sua aptidão.

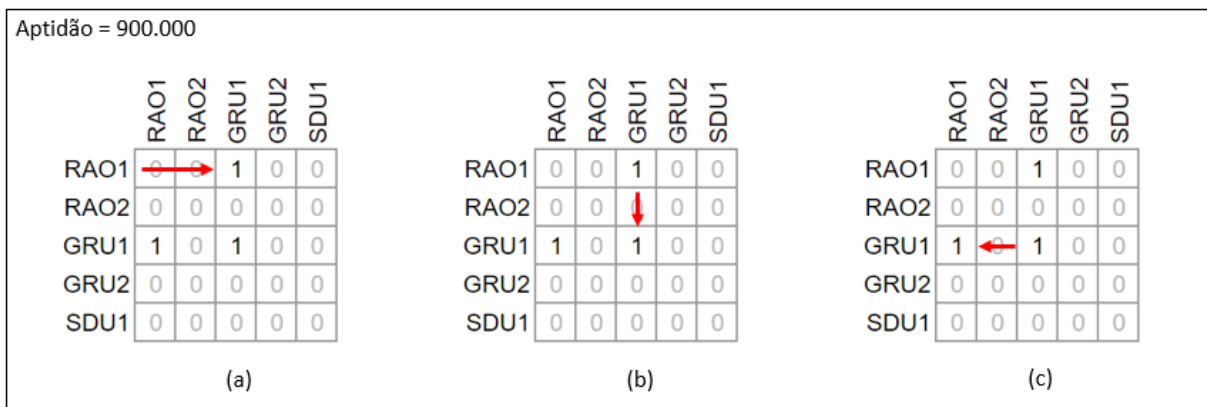
A grande diferença entre os dois modelos implementados está na aptidão utilizada. Conforme apresentado na Seção 3.2, as restrições para os dois modelos matemáticos são as mesmas, mudando apenas a Função Objetivo de cada modelo. Enquanto o Modelo Matemático 1 (Seção 3.3.1.) utiliza as receitas de cada mercado (R_{ij}), o Modelo Matemático 2 (Seção 3.3.2.) aborda o Momento de Transporte, excluindo as receitas e incluindo o tempo de viagem entre cada par O-D (T_{ij}).

A quantidade de passageiros atendidos para cada voo de i para j (pa_{ij}) é determinada pela demanda do trecho (d_{ij}) e capacidade da aeronave que o opera (C^f). Para demanda maior que a capacidade da aeronave, o número de passageiros transportados no voo de i para j é igual à capacidade da aeronave. Caso contrário, a quantidade de passageiros transportados é igual à demanda do trecho, garantindo as restrições 7, 8 e 9 dos modelos matemáticos.

A seguir é apresentado um exemplo ilustrado na Figura 12 e Quadro 11, a matriz apresenta três aeroportos, Ribeirão Preto (RAO), Guarulhos (GRU), com dois horários de partida e de chegada cada, e Santos Dumont (SDU), com um horário de partida e de chegada.

No exemplo, é definida a programação de voos de determinada aeronave: A aeronave parte de Ribeirão Preto com destino a Guarulhos, atendendo o mercado RAO1 para GRU1 (a). De modo a atender o próximo voo é necessário aguardar em solo (b). Este tempo de espera é chamada de conexão, sendo ela o período de espera entre o horário de chegada de um voo anterior e o horário de partida de um voo posterior, em um mesmo aeroporto. No exemplo, o voo seguinte atendido é de Guarulhos para Ribeirão Preto (GRU1 para RAO1) (c).

Figura 12 - Exemplo 1 de Programação de Voos



Fonte: Autoria própria (2022).

O Quadro 11 representa a programação horária dos voos atendidos (RAO1 para GRU1, e GRU1 para RAO1) e a conexão de 50 minutos entre os dois voos.

Quadro 11 – Tabela de Voos do Exemplo 1

Finalidade	Identificação da Origem	Origem	Horário de Partida	Identificação do Destino	Destino	Horário de Chegada
Voo	RAO1	Ribeirão Preto	06:30	GRU1	Guarulhos	07:35
Conexão	GRU1	Guarulhos	07:35	GRU1	Guarulhos	08:25
Voo	GRU1	Guarulhos	08:25	RAO1	Ribeirão Preto	09:40

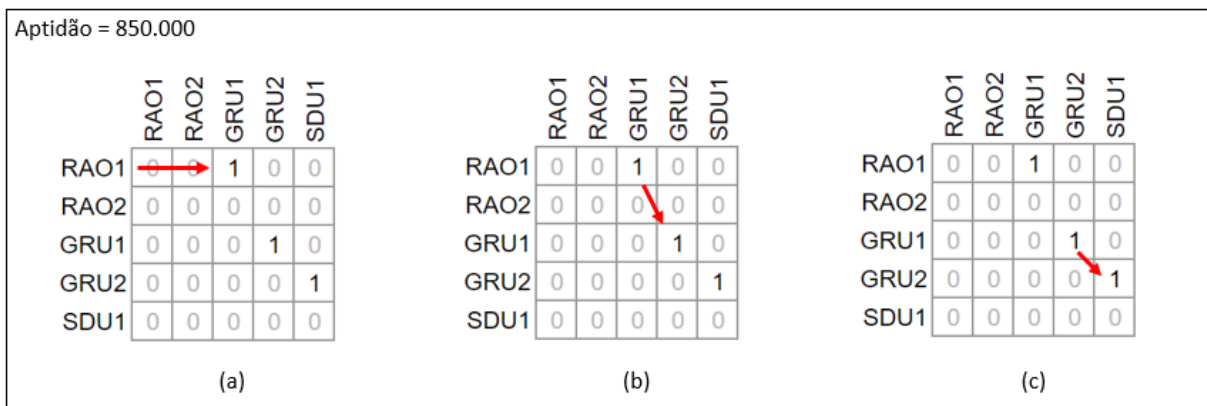
Fonte: Autoria própria (2022).

Vale destacar que qualquer voo com destino a um aeroporto pode ter conexão com outro voo futuro, partindo deste mesmo aeroporto, desde que o horário de chegada do primeiro seja menor que o de partida do segundo, e que respeite o tempo mínimo em solo para as atividades de embarque e desembarque de passageiros e cargas, abastecimento e demais atividades.

No segundo exemplo, apresentado na Figura 13 e Quadro 12, ao invés do voo de GRU1 para RAO1, a aeronave é alocada ao voo de GRU2 para SDU1 (c). Neste caso, a aeronave permanecerá em solo entre o horário de chegada de GRU1 e o horário de saída de GRU2 (b), de 2 horas e 40 minutos.

Observa-se que operar a programação do segundo exemplo, com a troca do segundo voo, melhora a aptidão da população (conforme Função Objetivo utilizada por cada modelo matemático). Ambos os exemplos seguem a restrição 3 dos modelos matemáticos, onde o aeroporto de destino do voo anterior deve coincidir com o aeroporto de origem do voo seguinte.

Figura 13 - Exemplo 2 de Programação de Voos



Fonte: Autoria própria (2022).

Quadro 12 – Tabela de Voos do Exemplo 2

Finalidade	Identificação da Origem	Origem	Horário de Partida	Identificação do Destino	Destino	Horário de Chegada
Voo	RAO1	Ribeirão Preto	06:30	GRU1	Guarulhos	07:35
Conexão	GRU1	Guarulhos	07:35	GRU2	Guarulhos	10:15
Voo	GRU2	Guarulhos	10:15	SDU1	Santos Dumont	11:05

Fonte: Autoria própria (2022).

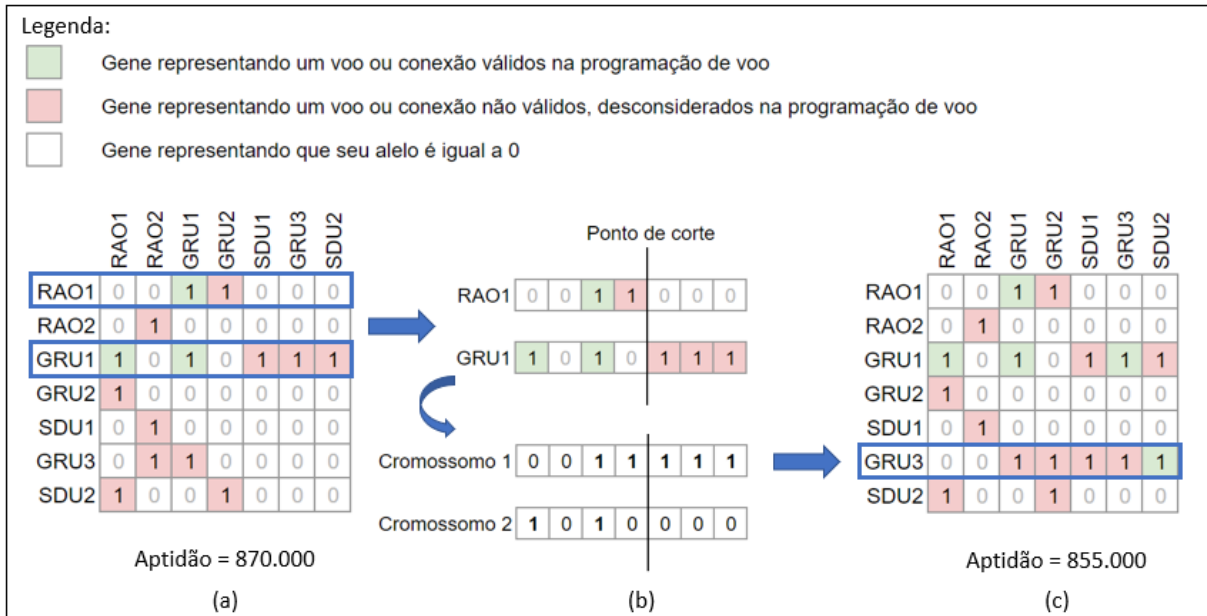
A programação inicial de cada aeronave do Algoritmo Genético é randômica e composta de dois voos e uma conexão. Como apenas 3 genes da programação recebem valor 1 (dois voos e uma conexão), cada indivíduo seria inicializado com um número muito baixo de genes iguais a 1, dificultando a geração de novos cromossomos diversificados após a operação de reprodução do AG.

Para otimizar o tempo de execução, durante a inicialização de cada indivíduo, além dos 3 genes da programação inicial de voos, é atribuído valor 1 em genes aleatórios que não representam voos. Inicializar a matriz com um número maior de genes iguais a 1 sem influenciar na aptidão, no sequenciamento de voos, e que respeite as restrições, permite gerar novos cromossomos em menor tempo de execução do AG, aumentando a diversificação dos cromossomos gerados.

Na Figura 14 é apresentada a operação de *crossover* entre os cromossomos RAO1 e GRU1 (a), contendo genes válidos representando dois voos e uma conexão (em verde) e outros genes aleatórios sem representar voos ou conexões (em vermelho). Com ponto de corte aleatório, foram gerados dois novos cromossomos 1 e 2. O AG verifica que substituir o cromossomo GRU3 pelo novo Cromossomo 1 resulta na inclusão de um novo voo na programação da aeronave, de GRU3 para SDU2 (c), melhorando a aptidão.

A substituição dos cromossomos só é feita caso o voo não tenha sido alocado a qualquer outra aeronave (restrição 2), se os aeroportos de chegada e partida entre voos consecutivos sejam os mesmos (restrição 3), e se os *slots* de chegada ou partida não sejam os mesmos para mais de um voo (restrições 5 e 6). O AG só irá substituir um cromossomo pelo novo gerado caso respeite as restrições e melhore a aptidão, caso contrário, permanece a programação anterior.

Figura 14 - Exemplo de Indivíduo com Genes Aleatórios e Reprodução



Fonte: Autoria própria (2022).

3.4.2. Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético é inicializado com uma programação de 2 voos e 1 conexão para cada uma das F aeronaves, e encerrando após 20 gerações. Em uma geração, a seleção de cada um dos dois pais é feita por torneio, a partir de 3 indivíduos selecionados aleatoriamente, escolhendo aquele com melhor aptidão (como o problema é de minimização, aquele com menor aptidão).

Com taxa de reprodução em 80%, o ponto de corte único para o *crossover* do cromossomo é aleatório, assim como o gene a sofrer mutação, conforme apresentado na subseção 2.4 (Figura 4), sendo a taxa de mutação definida em 1%. Gerados os novos cromossomos, é feita a troca parcial dos cromossomos na matriz, substituindo aqueles que melhorem a aptidão, minimizando-a. Porém, para incluir cada novo cromossomo na matriz de programação, eles devem ser voos válidos, capazes de manter o sequenciamento de voos da aeronave sem interrupção, conforme restrição 3, apresentada na seção 3.2.1. Para as demais restrições dos modelos matemáticos, o AG é capaz de verificar se cada novo cromossomo gerado não as infringe.

Realizadas as 20 gerações, retorna-se então a programação final de voos de cada aeronave e aptidão das F aeronaves. Apesar de ser um indivíduo para cada aeronave, a aptidão é avaliada considerando todos os indivíduos, ou seja, o conjunto

das programações é que determinam o valor da aptidão, conforme modelos 1 e 2, apresentados na seção 3.2.

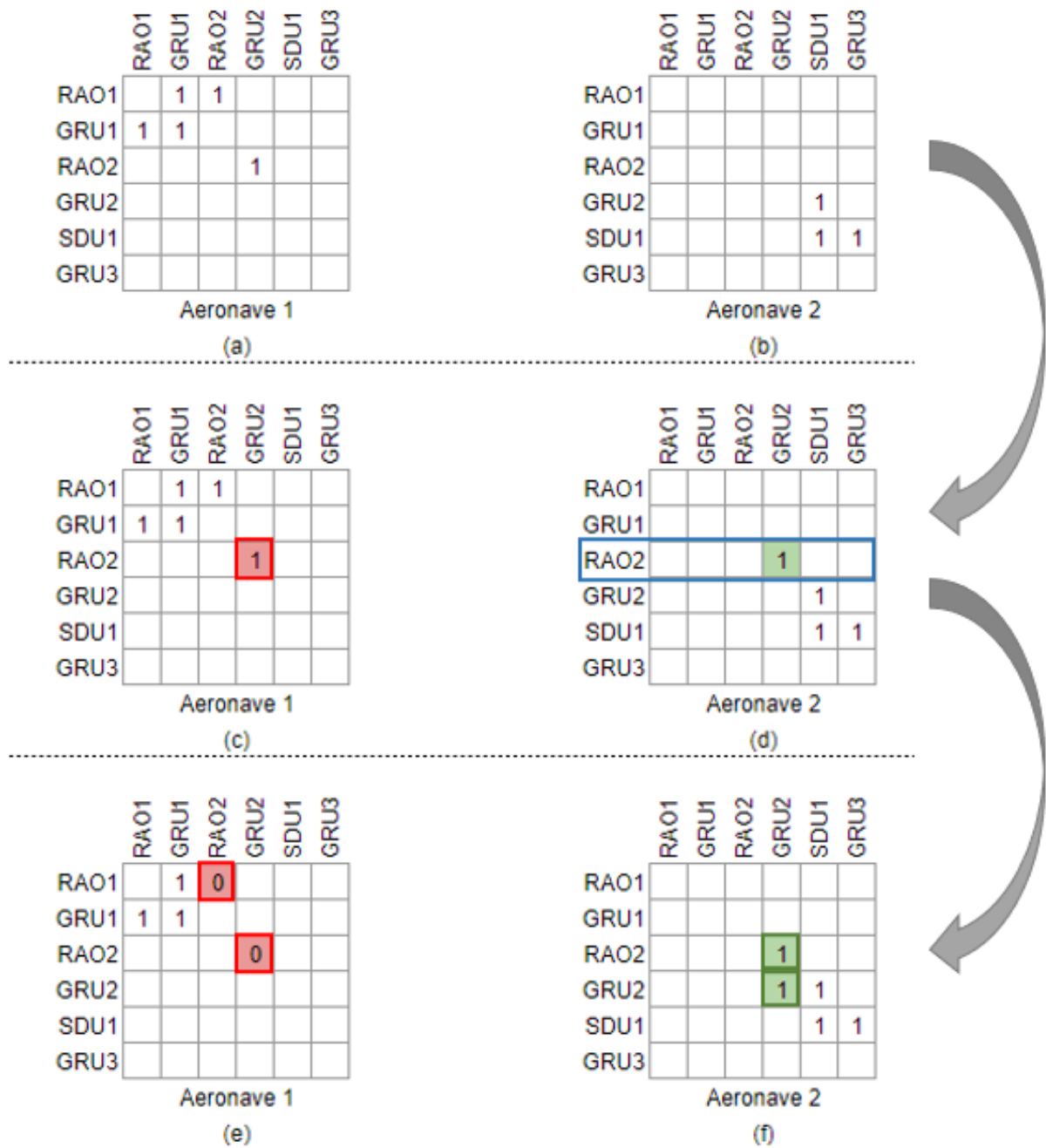
3.4.3. Operações de Inclusão e Exclusão de Voos

Neste trabalho, foi praticado o AG com melhoria proposto por Chu e Beasley (1997), permitindo a melhora local e o controle da diversificação acentuado. No algoritmo desenvolvido, é permitida a inclusão de um novo voo no início ou final da programação de cada aeronave, ou substituição do primeiro ou último voo da programação, incrementando as programações a cada nova geração. Além de permitir tais inclusões ou substituições, é possível também remover voos que fazem parte da programação de outra aeronave. Essa possibilidade é fundamental para que um mesmo voo de i para j não esteja contido na programação de duas aeronaves diferentes, conforme restrição 2, ou se dois voos não estejam utilizando o mesmo *slot* de pouso ou decolagem para determinado aeroporto.

Na Figura 15, é ilustrado um exemplo de inserção de novo voo na programação de voos de uma aeronave, já existente na programação de outra (apenas os genes com alelos iguais a 1 e representando voos válidos foram ilustrados). A programação de voos do Indivíduo 1 (Aeronave 1) realiza a seguinte sequência de voos: RAO1 para GRU1, GRU1 para RAO1, RAO2 para GRU2 (a). Já a programação de voos do Indivíduo 2 (Aeronave 2) realiza a sequência: GRU 2 para SDU1, SDU1 para GRU3 (b).

Após as operações de reprodução, o cromossomo RAO2 da Aeronave 2 apresentou um novo voo válido de RAO2 para GRU2 (d), sendo este também um voo da programação da Aeronave 1 (c). O AG então altera o alelo do gene da Programação de Voos da Aeronave 1 para 0, assim como a conexão entre RAO1 e RAO2 (e), além de alterar o alelo do gene referente à conexão entre GRU1 e GRU1 (f). Caso as novas programações de voos das aeronaves 1 e 2 resultem numa melhor aptidão da população, o AG as mantém. Caso contrário, o AG retorna às programações originais (a) e (b).

Figura 15 - Exemplo de Inclusão e Remoção de um Voo



Fonte: Autoria própria (2022).

3.4.4. Populações Válidas

Apesar do AG ser capaz de gerar inúmeros sequenciamentos, é necessário restringir a programação de voos a sequências que se repitam diariamente, onde o primeiro aeroporto de partida da programação de voos coincida com o último aeroporto de destino do dia, garantindo que a programação seja repetida diariamente por aquela aeronave, conforme a Modelagem Espaço-Tempo de Berge e Hoperstead (1993 apud SHERALI et al. apud CAETANO; GUALDA, 2011a).

Para encontrar uma programação de voos que se repita diariamente para cada aeronave, as seguintes considerações foram feitas:

- a) Identificação de todos os primeiros voos do dia na Tabela de Voos do Apêndice E;
- b) Execução do AG utilizando a tabela de voos sem os voos identificados no item (a);
- c) Após o AG gerar as programações de voos para todas as aeronaves, são incluídos os primeiros voos do dia identificados no item (a) no início da programação de voos de cada aeronave, de modo que o último aeroporto de destino da programação de cada aeronave coincida com o aeroporto de origem do voo inserido. Caso não seja possível incluir o voo de início, o resultado do AG é tido como não válido visto que gerou pelo menos uma programação de voos não cíclica.

Caso não fossem feitas as considerações acima, o AG teria um incalculável tempo de execução para encontrar uma solução com programações cíclicas de voos para todas as aeronaves. Além disso, não é possível afirmar que as programações cíclicas representam a solução com melhor aptidão.

O Quadro 13 exemplifica a operação de inclusão do primeiro voo de origem à programação de voos, de modo a garantir que a programação de voos de determinada aeronave se repita diariamente. No exemplo, o AG resultou na sequência de voos de 1 a 5, iniciando a programação em Ribeirão Preto, e finalizando o último voo em Congonhas.

A sequência gerada pelo AG não é válida para a programação diária da aeronave, dada diferença de aeroportos de início e fim. Como o último aeroporto atendido na programação da aeronave é o aeroporto de Congonhas, para garantir a

repetição diária, foi necessário incluir o voo da sequência 0, com origem em Congonhas, garantindo uma programação de voos que se repete diariamente para a determinada aeronave.

Quadro 13 – Inclusão de Voo Inicial na Programação de Uma Aeronave

Sequência	Origem	Horário de Partida	Destino	Horário de Destino
0	Congonhas (SP)	07:20:00	Ribeirão Preto	08:30:00
1	Ribeirão Preto	11:15:00	Guarulhos (SP)	12:35:00
2	Guarulhos (SP)	13:10:00	Joinville	14:35:00
3	Joinville	15:05:00	Guarulhos (SP)	16:40:00
4	Guarulhos (SP)	17:35:00	Ribeirão Preto	18:50:00
5	Ribeirão Preto	20:05:00	Congonhas (SP)	21:15:00

Fonte: Autoria própria (2022).

No Capítulo a seguir são apresentados os resultados operacionais de passageiros transportados e tempo em voo e em solo, e resultados econômicos, além das discussões apuradas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse Capítulo são apresentados os resultados operacionais e econômicos encontrados para os modelos matemáticos 1 e 2 (apresentados na Seção 3.2.), e para os grupos de aeronaves 1 e 2 (propostos na subseção 3.3.1.), além das discussões finais sobre os resultados. Para cada modelo e grupo de aeronaves, o AG foi repetido iterativamente por 48 horas, gerando inúmeras programações de voos, e escolhendo aquela de melhor aptidão.

As programações de voos geradas para cada grupo de aeronave e modelo estão disponibilizadas nos seguintes apêndices:

- Apêndice A: Modelo 1 e Grupo de Aeronaves 1;
- Apêndice B: Modelo 1 e Grupo de Aeronaves 2;
- Apêndice C: Modelo 2 e Grupo de Aeronaves 1;
- Apêndice D: Modelo 2 e Grupo de Aeronaves 2;

4.1. RESULTADOS OPERACIONAIS

4.1.1. Passageiros Transportados

Para análise dos Resultados Operacionais de Passageiros Transportados, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Soma dos voos programados;
- Soma dos passageiros transportados em todos os voos;
- Soma dos passageiros não transportados (apenas para os voos realizados, a demanda de voos não realizados não é somada);
- Soma dos assentos vagos em todos os voos de todas as aeronaves;
- Taxa Média de ocupação média das aeronaves, dada pela razão entre a soma de passageiros transportados e a quantidade total de assentos (número de assentos multiplicado pelo número de voos);
- Aptidão da melhor programação de voos encontrada para cada modelo e grupo de aeronaves.

No AG do Modelo Matemático 1, o Grupo de Aeronaves 1 foi capaz de transportar 72 passageiros a mais que o Grupo de Aeronaves 2 (4,1% a mais), mesmo com aeronaves de menor capacidade que o segundo. O maior número de passageiros transportados está diretamente relacionado aos 2 voos a mais programados para o primeiro grupo. Na Tabela 1, foram apresentados os Resultados Operacionais para o Modelo 1.

Tabela 1 – Resultados Operacionais para o Modelo Matemático 1

Grupo de Aeronaves	Voos Realizados	Passageiros Transportados	Passageiros Não Transportados	Assentos Vagos	Taxa Média de Ocupação	Aptidão
1	28	1.835	55	125	94%	921.666
2	26	1.763	12	149	92%	947.700

Fonte: Autoria própria (2022).

Por ser um grupo de menor capacidade e transportar mais passageiros, o Grupo 1 resultou em uma taxa média de ocupação das aeronaves 2% maior e em 24 assentos vagos a menos que o Grupo 2. De fato, grupos de aeronaves de menor capacidade, como o caso do Grupo 1, irão apresentar uma maior taxa média de ocupação quando comparados a grupos de aeronaves de maior capacidade, como o Grupo 2, em mercados de demandas semelhantes, sendo que o primeiro possui 95,65% da capacidade do segundo.

Porém, como consequência da menor capacidade, o Grupo 1 acaba por não ser capaz de transportar passageiros em voos com demanda maior que o número de assentos da aeronave alocada, gerando perda de potencial receita. A diferença de 4,35% na capacidade do Grupo 1 em relação ao Grupo 2 gerou um valor 4,6 vezes maior no número de passageiros não transportados.

Apesar do maior número de passageiros não transportados, na comparação das aptidões definidas pela Função Objetivo do Modelo Matemático 1, o Grupo de Aeronaves 1 resultou em uma aptidão 2,7% melhor que a do Grupo 2. Mesmo deixando de transportar 43 passageiros a mais que o segundo grupo, o primeiro grupo compensou a perda de potencial receita transportando 72 passageiros a mais.

Com padrões semelhantes aos do Modelo Matemático 1, o Modelo Matemático 2 gerou uma melhor programação de voos para o Grupo de Aeronaves 1, mesmo essa sendo de menor capacidade. As programações do primeiro grupo sequenciaram 2 voos a mais e, como consequência, transportaram um número maior de 70 passageiros (3,4% a mais). Os Resultados Operacionais para o Modelo 2 foram apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Resultados Operacionais para o Modelo Matemático 2

Grupo de Aeronaves	Voos Realizados	Passageiros Transportados	Passageiros Não Transportados	Assentos Vagos	Taxa Média de Ocupação	Aptidão
1	32	2.107	28	149	93%	575.710
2	30	2.037	9	167	92%	618.820

Fonte: Autoria própria (2022).

Por conta de sua menor capacidade e do maior número passageiros transportados, o primeiro grupo teve 18 assentos vagos a menos e uma taxa média de ocupação das aeronaves 1% maior que o segundo grupo, porém com um valor 3 vezes maior no número de passageiros não transportados. A aptidão do primeiro grupo foi 7% melhor que a do segundo, pois os 70 passageiros a mais transportados compensam os 19 passageiros não atendidos.

Em ambos os modelos, observa-se o padrão do Grupo 1 em apresentar melhores aptidões, taxas médias de ocupação e número de passageiros transportados, sendo que este compensa o maior número de passageiros não atendidos por conta da menor capacidade das aeronaves.

Observa-se que o Grupo 1 foi capaz de melhor se adequar aos voos propostos, principalmente por conta de a demanda média ser de aproximadamente 64 passageiros por mercado, e por conter aeronaves com configurações de assentos de quantidade inferior às do Grupo 2.

Porém, apenas a quantidade de passageiros transportados e não transportados não é suficiente para determinar a melhor decisão ao não atender um grupo de passageiros, dada variação no preço da tarifa média por cada trecho. Portanto, é necessário verificar também os resultados econômicos gerados pelas programações de voos para cada grupo de aeronaves.

Sobre o número de voos programados, apesar da Tabela de Voos disponibilizada no Apêndice E conter 60 voos, cada grupo de aeronaves é capaz de atender aproximadamente 30 voos. Isso se deve ao fato de que, para um mesmo aeroporto e mesmo horário de partida ou chegada, diferentes mercados são oferecidos. Isso se deve aos horários de pouso e decolagem (*slots*) serem restritos à 1 voo, apenas um dos voos de mesmo horário de partida ou chegada, no mesmo aeroporto, poderá ser atendido.

4.1.2. Tempo em Voo e em Solo

Cada período em conexão representa uma perda de potencial receita, gerando apenas custos inerentes à sua operação (como manutenção, valor de arrendamento etc.), pois apenas ao executar um voo é que a aeronave gera receita à empresa aérea. Portanto, considerar os períodos em voo e em solo de cada aeronave são essenciais na análise crítica da programação de voos.

Apesar da maximização da receita ao passo em que se minimiza os tempos em solo, operar uma programação de voos enxuta, com apenas o mínimo tempo em solo, pode levá-la a ter problemas de perturbação da malha aérea. Portanto, o ideal é a busca por uma programação robusta, que possua períodos suficientemente curtos em solo, mas que minimize a propagação de potenciais atrasos para as demais etapas do planejamento da malha aérea.

Para a análise de resultados dos tempos em voo e em solo, foram utilizados os parâmetros a seguir:

- Tempos mínimo e médio em solo de todas as aeronaves do grupo;
- Quantidade de conexões iguais 30 minutos;
- Tempo total em solo de todas as aeronaves do grupo;
- Tempo total em voo de todas as aeronaves do grupo;
- Percentual do tempo em voo de todas as aeronaves do grupo.

No Modelo Matemático 1, ambos os grupos de aeronaves apresentaram um tempo mínimo em solo de 30 minutos, conforme definido na subseção 3.3.3. No entanto, o segundo grupo de aeronaves apresentou um tempo médio em solo maior em 9 minutos, com 5 conexões a menos de tempo mínimo em solo e,

consequentemente, 4% a menos no tempo de voo. O maior tempo em voo do Grupo de Aeronaves 1 pode ser explicado pelos 2 voos a mais em sua programação, contribuindo para o menor tempo médio em solo. A Tabela 3 apresenta os Resultados dos Tempos de Voo para o Modelo Matemático 1.

Tabela 3 – Resultados de Tempo de Voo e em Solo para o Modelo Matemático 1

Grupo de Aeronaves	Tempo Mínimo em solo (min)	Tempo Médio em solo (min)	Qtd. De Conexões iguais a 30 minutos	Tempo Total em solo (min)	Tempo Total em Voo (min)	% Tempo em Voo
1	30	88	9	2.025	2.540	56%
2	30	97	4	2.045	2.355	54%

Fonte: Autoria própria (2022).

O maior tempo médio em solo representa uma maior robustez, em troca de maior tempo em voo e, efetivamente gerando receita. Uma maior robustez é garantida quando se minimiza a quantidade de conexões iguais ao mínimo necessário para realizar todas as operações em solo (como embarque e desembarque de passageiros e bagagens, abastecimento, troca de tripulantes etc.), definido neste trabalho como 30 minutos.

Ou seja, qualquer tempo em solo maior que o necessário minimiza a propagação de atrasos para o restante dos voos programados, visto que o tempo necessário para as operações é de 30 minutos. Já tempos iguais a 30 minutos não permitem uma margem para atrasos sem que o período perdido seja propagado aos demais voos posteriores. Enquanto o tempo mínimo total em solo do Grupo 1 representa 13% do tempo total em solo, para o Grupo 2 representa apenas 6%.

Nos resultados de tempo para o Modelo Matemático 2, apresentados na Tabela 4, os dois grupos de aeronaves obtiveram valores muito próximos no tempo médio em solo, e percentual no tempo em voo, apesar do primeiro grupo ter 2 voos a mais em sua programação.

Tabela 4 – Resultados de Tempo de Voo e em Solo para o Modelo Matemático 2

Grupo de Aeronaves	Tempo Mínimo em solo (min)	Tempo Médio em solo (min)	Qtd. De Conexões iguais a 30 minutos	Tempo Total em solo (min)	Tempo Total em Voo (min)	% Tempo em Voo
1	30	76	11	2.060	3.025	59%
2	30	74	9	1.860	2.670	59%

Fonte: Autoria própria (2022).

Todas as programações apresentaram tempo mínimo em solo de 30 minutos, conforme restrição considerada na implementação do AG. Caso não fosse considerado tal tempo mínimo, o AG poderia resultar em programações de voos com conexões de 10 a 15 minutos entre determinados voos, conforme tabela de horários no Apêndice E, prejudicando a robustez da programação de voos.

4.2. RESULTADOS ECONÔMICOS

Os seguintes parâmetros foram utilizados para comparação dos desempenhos econômicos, apresentados na Tabela 6:

- Receita gerada, por frota e por modelo;
- Receita perdida pelo não atendimento da demanda total de cada voo, por frota e por modelo, sendo o produto da quantidade de passageiros não transportados e a tarifa daquele mercado;
- Receita média por voo de cada frota, em cada modelo;
- Receita média por passageiro em cada frota, em cada modelo.

Para o Modelo Matemático 1, as programações de voos do Grupo 1 gerou, 2,6% a mais em receitas que as do Grupo 2, por conta dos 2 voos e 4,1% passageiros a mais. Porém, devido ao número de passageiros não transportados ser 4,6 vezes maior, a receita potencial perdida foi 4,9 vezes maior que a do segundo grupo.

Como esperado, por conta do maior número de voos e passageiros atendidos, ao calcular a receita média por voo e por passageiro, o Grupo 1 apresentou números levemente menores em comparação ao Grupo 2 (R\$ 1.632,70 e R\$7,18 respectivamente). Na Tabela 5, é possível verificar os parâmetros de receitas geradas pelas programações dos grupos 1 e 2 para o Modelo 1.

Tabela 5 – Resultados Econômicos para o Modelo Matemático 1

Grupo de Aeronaves	Receita Gerada (R\$)	Receita Perdida (R\$)	Receita Média (por Voo)	Receita Média (por Passageiro)
1	925.585,40	35.772,37	33.056,62	504,41
2	901.930,23	7.250,24	34.689,62	511,59

Fonte: Autoria própria (2022).

As programações de voos geradas para os grupos de aeronaves, a partir do Modelo 2, apresentaram receitas próximas, com uma diferença de apenas 1,9% a mais para o primeiro grupo de aeronaves, mesmo este transportando 3,4% passageiros a mais que o segundo. Da mesma forma que no Modelo 1, a maior quantidade de voos e passageiros do Modelo 2 resultou em menores receitas médias por voo e por passageiro.

Tabela 6 – Resultados Econômicos para o Modelo Matemático 2

Grupo de Aeronaves	Receita Gerada (R\$)	Receita Perdida (R\$)	Receita Média (por Voo)	Receita Média (por Passageiro)
1	870.299,11	19.827,70	27.196,85	413,05
2	853.785,51	4.634,40	28.459,52	419,14

Fonte: Autoria própria (2022).

Por conta da menor quantidade de voos das programações do grupo 2 em ambos os modelos, a receita média por voo e por passageiro apresentou valores acima daqueles encontrados para o grupo 1, de 5 e 2% respectivamente.

Ao passo em que o grupo 1 nos dois modelos apresentou maiores receitas, esse foi também responsável por uma receita perdida de 4 a 5 vezes maior que a do segundo grupo, devido ao número de passageiros não atendidos variar de 28 a 55, frente aos 9 a 12 passageiros não atendidos pelas programações geradas para o grupo 2.









É possível concluir que, mesmo com uma maior perda de potenciais passageiros, e consequentemente de receita perdida, o AG é capaz de alocar uma programação mais rentável para o Grupo 1, de menor capacidade, independente do Modelo Matemático utilizado.

4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao comparar ambos os grupos de aeronaves propostos, para os dois modelos, o Grupo 1 apresentou melhores valores de aptidão, taxa média de ocupação das aeronaves, número de passageiros transportados e receita total gerada, mesmo com maior valor de receita perdida.

Já para o Grupo 2, foram geradas programações de voos com menores demandas não atendidas, e conseqüentemente menores receitas perdidas, por conta da maior capacidade da frota. O Quadro 14, a seguir, apresenta as comparações entre os grupos de aeronaves, indicando qual grupo foi melhor ou pior para os parâmetros apresentados anteriormente, onde setas para cima representam valores maiores, setas para baixo representam valores menores, setas em verde para valores melhores e em vermelho para valores piores.

Quadro 14 – Comparação entre os Grupos de Aeronaves

	Grupo 1	Grupo 2
Voos Realizados		
Passageiros Transportados		
Passageiros Não Transportados		
Assentos Vagos		
Taxa Média de Ocupação		
Receita Gerada		
Receita Perdida		

Fonte: Autoria própria (2022).

O Modelo Matemático 1, como esperado, gerou programações de voo mais rentáveis para ambos os grupos de aeronaves, comparadas às do Modelo Matemático 2, mesmo com menores quantidades de voos e de passageiros transportados. Isso se deve ao fato de a Função Objetivo do primeiro modelo minimizar a perda de receita, mesmo que a uma maior perda de demanda, atendendo os mercados mais lucrativos. Ou seja, o AG opta por ter uma maior quantidade de passageiros não atendidos do que uma maior perda de receita, atendendo os voos com maior rentabilidade.

Ao contrário do Modelo Matemático 1, o Modelo Matemático 2 não considera a perda de potencial receita, mas sim o Momento de Transporte (produto da quantidade de passageiros não atendidos pelo tempo do respectivo voo). Portanto, observa-se que, mesmo atendendo um número maior de passageiros, quando comparado ao Modelo Matemático 1, os grupos de aeronaves propostos ao Modelo Matemático 2 não foram capazes de gerar uma melhor receita, tampouco maiores receitas médias por voo e por passageiro, claramente devido à sua Função Objetivo.

A utilização deste modelo é mais interessante quando se busca atender o maior número possível de destinos, maximizar a ocupação das aeronaves (alterando os valores de α e β), ou quando as receitas por cada trecho não estão disponíveis para utilização como parâmetro de entrada.

Após a apresentação dos resultados, observa-se que realizar apenas a análise operacional ou a econômica para as diferentes programações geradas é insuficiente para a tomada de decisão, visto que a frota de menor capacidade foi a que transportou uma maior quantidade de passageiros e gerou maiores receitas, mesmo com uma maior perda de potencial demanda.

No Capítulo a seguir são apresentadas as conclusões sobre o desenvolvimento do AG, modelos escolhidos, dados utilizados, e sugeridos futuros trabalhos sobre o tema apresentado.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados diferentes modelos de programação de voos e alocação de aeronaves apresentados em trabalhos acadêmicos. Após a utilização do método PRISMA e critérios definidos pelo autor, foram escolhidos dois modelos matemáticos para dar andamento ao estudo, além de ser implementado um Algoritmo Genético para realizar a busca da melhor programação de voos, a partir de cada modelo e frota. Por fim, o AG desenvolvido foi testado em dois grupos de aeronaves sugeridos pelo autor, utilizando dados de uma empresa aérea regional, de modo a analisar os resultados operacionais e econômicos das programações de voos.

O primeiro modelo escolhido busca minimizar a perda de receita pelo não atendimento de determinado número de passageiros ou voo. O segundo busca minimizar o Momento de Transporta, sendo este o produto entre o tempo de viagem e número de passageiros transportados. O AG desenvolvido para encontrar programações de voos e alocações de aeronaves para a empresa aérea regional, a partir dos modelos matemáticos escolhidos, provou ser capaz de gerar programações válidas, maximizando a quantidade de receita gerada, e minimizando a quantidade de passageiros não transportados, respectivamente.

Os dados de entrada utilizados, como demanda e tarifa, foram obtidos a partir de bases de dados mensais, disponibilizados pela ANAC. Como foram utilizados valores médios, a partir de dados mensais, os mesmos não condizem com a realidade das operações de voo, dada demanda não uniforme de passageiros ao longo do dia, e em cada dia da semana. Portanto, o ideal é utilizar previsões diárias e horárias de passageiros para cada origem e destino.

Sobre os modelos escolhidos, os mesmos tratam a demanda como fixa entre cada par O-D, sem considerar os passageiros distribuídos entre *hubs* da empresa. Na prática, a demanda para cada destino é composta pela demanda conjunta de diferentes origens, agrupadas e redistribuídas em seus *hubs*, onde um voo anterior não atendido pode influenciar na demanda de um posterior voo atendido.

Como futuros trabalhos, sugere-se implementar um AG multi-objetivo a partir dos modelos matemáticos escolhidos para este trabalho, e a utilização de outros modelos que considerem demanda recapturada em *hubs*.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHANY, A.; ABDELGHANY, K.; AZADIAN, F. Airline flight schedule planning under competition. **Computers & Operations Research**, v. 87, p. 20-39, maio 2017.
- AHUJA, R. K. *et al.* A neighborhood search algorithm for the combined through and fleet assignment model with time windows. **Networks: An International Journal**, v. 44, n. 2, p. 160-171, jul. 2004.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Gráficos e Tabelas**. Anuário do Transporte Aéreo. ANAC, 2019a. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo>. Acesso em: 22 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Voos e Operações Aéreas**. ANAC, 2022a. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas>. Acesso em: 12 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Resolução Nº 682**, de 7 de junho de 2022b. Regulamenta a coordenação de aeroportos e dispõe sobre as regras de alocação e monitoramento do uso da infraestrutura aeroportuária. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2022/resolucao-682>. Acesso em: 30 maio 2022.
- BARNHART, C.; BELOBABA, P.; ODONI, A. R. Applications of operations research in the air transport industry. **Transportation Science**. Cambridge, v. 37, n. 4, p. 368-391, nov. 2003.
- BRASIL. Presidência da República. Secretaria-Geral. Lei Nº 13.475 de 28 de agosto de 2017. Dispõe sobre o exercício da profissão de tripulante de aeronave, denominado aeronauta. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13475.htm. Acesso em: 30 maio 2022.
- CACCHIANI, V.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J.-J. Optimal solutions to a real-world integrated airline scheduling problem. **Transportation Science**, v. 51, n. 1, p. 250-268, abr. 2016.
- CAETANO, D. J. **Modelagem integrada para a programação de voos e alocação de frotas: abordagens baseadas em programação linear inteira e na meta-heurística colônia de formigas**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- CAETANO, D. J.; GUALDA, N. D. F. An aco-based model to solve the schedule generation and fleet assignment integrated problem. *In: Proceedings of the international conference on evolutionary computation theory and applications (ECTA-2011)*. Science and Technology Publications (SCITEPRESS). Paris, 24 a 26 de outubro de 2011a.
- CAETANO, D. J.; GUALDA, N. D. F. Um modelo integrado para a programação de voos e alocação de frota. **Transportes**, v. 19, n. 2, p. 16-24, maio 2011b.

CAETANO, D.J.; GUALDA, N. D. F. An exact model for airline flight network optimization based on transport momentum and aircraft load factor. **Transportes**, v. 25, n. 4, dez. 2017.

CHU, P.; BEASLEY J. E. A Genetic Algorithm for the Generalized Assignment Problem, *Computers and Operation Research*. **Computers & Operations Research**, v. 24, n. 1, p. 17-23, jan. 1997.

DONG, Z.; CHUHANG, Y.; LAU, H.Y.K.H. An integrated flight scheduling and fleet assignment method based on a discrete choice model. **Computers & Industrial Engineering**, v. 98, p. 195-210, jun. 2016.

DUNBAR, M.; FROYLAND, G.; WU, C.-L. Robust airline schedule planning: minimizing propagated delay in an integrated routing and crewing framework. **Transportation Science**, v. 46, n. 2, p. 204-216, maio 2012.

GOMES, W. P. **Programação de tripulantes de aeronaves no contexto brasileiro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOMES, W. P.; GUALDA, N. D. F. Modelagem integrada do problema de programação de tripulantes de aeronaves. **Transportes**, v. 19, n. 1, p. 23-32, maio 2011.

GOMES, D. F. *et al.* Avaliação formativa em saúde: uma análise das evidências latino-americanas. **Revista Saúde**, v. 47, n. 1, 2021.

GREAT CIRCLE MAP. Disponível em: <http://www.gcmap.com/>. Acesso em: 05 nov. 2022.

GÜRKAN, H.; GÜREL, S.; AKTÜRK, M. S. An integrated approach for airline scheduling, aircraft fleetling and routing with cruise speed control. **Transportation Research Part C**, v. 68, p. 38-57, abr. 2016.

HANE, C. A. *et al.* The fleet assignment problem: solving a large-scale integer program. **Mathematical Programming**, v. 70, p. 211-232, 1995.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Michigan: University of Michigan Press, 1975.

JAMILI, A. A robust mathematical model and heuristic algorithms for integrated aircraft routing and scheduling, with consideration of fleet assignment problem. **Journal of Air Transport Management**, v. 58, p. 21-30, set. 2016.

JIANG, H.; BARNHART, C. Dynamic Airline Scheduling. **Transportation Science**, v. 43, n. 3, p. 336-354, ago. 2009.

KENAN, N.; JEBALI, A.; DIABAT, A. An integrated flight scheduling and fleet assignment problem under uncertainty. **Computers and Operations Research**, v. 100, p. 333-342, set. 2017.

KHANMIRZA, E.; NAZARAHARI, M.; HAGHBEIGI, M. A heuristic approach for optimal integrated airline schedule design and fleet assignment with demand recapture. **Applied Soft Computing Journal**, v. 96, ago. 2020.

KLABJAN, D. Large-scale models in the airline industry. *In: Column Generation*. Kluwer Scientific Publishers, 2004. p. 163-196.

LOHATEPANONT, M.; BARNHART, C. Airline schedule planning: integrated models and algorithms for schedule design and fleet assignment. **Transportation Science**, v. 38, n. 1, p. 19-32, fev. 2004.

MARLA, L.; VAZE, V.; BARNHART, C. Robust optimization: lessons learned from aircraft routing. **Computers and Operations Research**, v. 98, p. 165-184, maio 2018.

PAGE, M. J. *et al.* Updating guidance for reporting systematic reviews: development of the PRISMA 2020 statement. **Journal of Clinical Epidemiology** 2021, v.134, p. 103-112, jun. 2021

PAPADAKOS, N. Integrated airline scheduling. **Computers and Operations Research**, v. 36, p. 176-195, ago. 2007.

PITA, J. P.; BARNHART, C.; ANTUNES, A. P. Integrated flight scheduling and fleet assignment under airport congestion. **Transportation Science**, v. 47, n. 4, p. 477-492, nov. 2013.

PLANESPOTTERS. Disponível em [planespotters.net/airline/Voepass](https://www.planespotters.net/airline/Voepass) (2022). Acesso em: 08 nov. 2022.

RABETANETY, A. **Airline schedule planning integrated flight schedule design and product line design**. 2006. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) - Instituto de Algoritmos e Sistemas Cognitivos, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2006.

REXING, B.; BARNHART, C.; KNIKER, T. Airline fleet assignment with time windows. **Transportation Science**, v. 34, n. 1, p. 1-20, fev. 2000.

SANTOS, I. S. **Análise da elaboração de instrumentos de ação pública na agência nacional de aviação civil (ANAC):** Revisão da Resolução nº 279. Monografia (Graduação em Gestão de Políticas Públicas) – Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

WANG, T.-C.; LI, C.-M. Fleet assignment with a continuously adjustable flight schedule. **Transportation Journal**, v. 52, n. 3, p. 323-343, 2013.

WEI, M. *et al.* An integrated optimization mode for multi-type aircraft flight scheduling and routing problem. **Mathematical Biosciences and Engineering**, v. 17, n. 5, p. 4990-5004, jul. 2020.

XU, Y; WANDELT, S.; SUN, X. Airline integrated robust scheduling with a variable neighborhood search based heuristic. **Transportation Research Part B**, v. 149, p. 181-203, maio 2021.

YAN, S.; TANG, C.-H.; FU, T.-C. An airline scheduling model and solution algorithms under stochastic demands. **European Journal of Operational Research**, v. 190, n. 1, p. 22-39, jun. 2007.

APÊNDICE A – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 1 E MODELO 1

AC	Finalidade	Origem	Horário de Partida	Destino	Horário de Chegada
0	Voo	Ribeirão Preto	09:00:00	Congonhas (SP)	10:10:00
0	Conexão	Congonhas (SP)	10:10:00	Congonhas (SP)	10:40:00
0	Voo	Congonhas (SP)	10:40:00	Ribeirão Preto	11:50:00
0	Conexão	Ribeirão Preto	11:50:00	Ribeirão Preto	12:30:00
0	Voo	Ribeirão Preto	12:30:00	Santos Dumont (RJ)	14:00:00
0	Conexão	Santos Dumont (RJ)	14:00:00	Santos Dumont (RJ)	14:40:00
0	Voo	Santos Dumont (RJ)	14:40:00	Ribeirão Preto	16:30:00
0	Conexão	Ribeirão Preto	16:30:00	Ribeirão Preto	19:20:00
0	Voo	Ribeirão Preto	19:20:00	Guarulhos (SP)	20:40:00
0	Conexão	Guarulhos (SP)	20:40:00	Guarulhos (SP)	22:20:00
0	Voo	Guarulhos (SP)	22:20:00	Ribeirão Preto	23:35:00
1	Voo	Ribeirão Preto	06:15:00	Guarulhos (SP)	07:35:00
1	Conexão	Guarulhos (SP)	07:35:00	Guarulhos (SP)	08:25:00
1	Voo	Guarulhos (SP)	08:25:00	Ribeirão Preto	09:40:00
1	Conexão	Ribeirão Preto	09:40:00	Ribeirão Preto	12:00:00
1	Voo	Ribeirão Preto	12:00:00	Congonhas (SP)	13:10:00
1	Conexão	Congonhas (SP)	13:10:00	Congonhas (SP)	13:50:00
1	Voo	Congonhas (SP)	13:50:00	Ribeirão Preto	15:00:00
1	Conexão	Ribeirão Preto	15:00:00	Ribeirão Preto	15:30:00
1	Voo	Ribeirão Preto	15:30:00	Santos Dumont (RJ)	17:00:00
1	Conexão	Santos Dumont (RJ)	17:00:00	Santos Dumont (RJ)	17:45:00
1	Voo	Santos Dumont (RJ)	17:45:00	Ribeirão Preto	19:35:00
1	Conexão	Ribeirão Preto	19:35:00	Ribeirão Preto	20:05:00
1	Voo	Ribeirão Preto	20:05:00	Congonhas (SP)	21:15:00
1	Conexão	Congonhas (SP)	21:15:00	Congonhas (SP)	21:45:00
1	Voo	Congonhas (SP)	21:45:00	Ribeirão Preto	22:55:00
2	Voo	Goiânia	07:00:00	Ribeirão Preto	08:30:00
2	Conexão	Ribeirão Preto	08:30:00	Ribeirão Preto	16:30:00
2	Voo	Ribeirão Preto	16:30:00	Vitória	18:25:00
2	Conexão	Vitória	18:25:00	Vitória	18:55:00
2	Voo	Vitória	18:55:00	Ribeirão Preto	20:50:00
2	Conexão	Ribeirão Preto	20:50:00	Ribeirão Preto	21:20:00
2	Voo	Ribeirão Preto	21:20:00	Goiânia	22:50:00
3	Voo	Ribeirão Preto	07:00:00	Santos Dumont (RJ)	08:30:00
3	Conexão	Santos Dumont (RJ)	08:30:00	Santos Dumont (RJ)	09:00:00
3	Voo	Santos Dumont (RJ)	09:00:00	Ribeirão Preto	10:50:00
3	Conexão	Ribeirão Preto	10:50:00	Ribeirão Preto	12:30:00
3	Voo	Ribeirão Preto	12:30:00	Brasília	14:15:00

3	Conexão	Brasília	14:15:00	Brasília	15:00:00
3	Voo	Brasília	15:00:00	Ribeirão Preto	16:45:00
3	Conexão	Ribeirão Preto	16:45:00	Ribeirão Preto	17:15:00
3	Voo	Ribeirão Preto	17:15:00	Congonhas (SP)	18:25:00
3	Conexão	Congonhas (SP)	18:25:00	Congonhas (SP)	18:55:00
3	Voo	Congonhas (SP)	18:55:00	Ribeirão Preto	20:05:00
4	Voo	Uberlândia	06:30:00	Brasília	07:45:00
4	Conexão	Brasília	07:45:00	Brasília	11:35:00
4	Voo	Brasília	11:35:00	Araguaína	14:10:00
4	Conexão	Araguaína	14:10:00	Araguaína	15:55:00
4	Voo	Araguaína	15:55:00	Brasília	18:25:00
4	Conexão	Brasília	18:25:00	Brasília	21:15:00
4	Voo	Brasília	21:15:00	Uberlândia	22:25:00

APÊNDICE B – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 2 E MODELO 1

AC	Finalidade	Origem	Horário de Partida	Destino	Horário de Chegada
5	Voo	Ribeirão Preto	07:00:00	Santos Dumont (RJ)	08:30:00
5	Conexão	Santos Dumont (RJ)	08:30:00	Santos Dumont (RJ)	10:40:00
5	Voo	Santos Dumont (RJ)	10:40:00	Ribeirão Preto	12:30:00
5	Conexão	Ribeirão Preto	12:30:00	Ribeirão Preto	15:30:00
5	Voo	Ribeirão Preto	15:30:00	Santos Dumont (RJ)	17:00:00
5	Conexão	Santos Dumont (RJ)	17:00:00	Santos Dumont (RJ)	17:45:00
5	Voo	Santos Dumont (RJ)	17:45:00	Ribeirão Preto	19:35:00
5	Conexão	Ribeirão Preto	19:35:00	Ribeirão Preto	20:05:00
5	Voo	Ribeirão Preto	20:05:00	Congonhas (SP)	21:15:00
5	Conexão	Congonhas (SP)	21:15:00	Congonhas (SP)	21:45:00
5	Voo	Congonhas (SP)	21:45:00	Ribeirão Preto	22:55:00
6	Voo	Uberlândia	06:30:00	Brasília	07:45:00
6	Conexão	Brasília	07:45:00	Brasília	11:35:00
6	Voo	Brasília	11:35:00	Araguaína	14:10:00
6	Conexão	Araguaína	14:10:00	Araguaína	15:55:00
6	Voo	Araguaína	15:55:00	Brasília	18:25:00
6	Conexão	Brasília	18:25:00	Brasília	21:15:00
6	Voo	Brasília	21:15:00	Uberlândia	22:25:00
7	Voo	Congonhas (SP)	07:20:00	Ribeirão Preto	08:30:00
7	Conexão	Ribeirão Preto	08:30:00	Ribeirão Preto	12:30:00
7	Voo	Ribeirão Preto	12:30:00	Santos Dumont (RJ)	14:00:00
7	Conexão	Santos Dumont (RJ)	14:00:00	Santos Dumont (RJ)	14:40:00
7	Voo	Santos Dumont (RJ)	14:40:00	Ribeirão Preto	16:30:00
7	Conexão	Ribeirão Preto	16:30:00	Ribeirão Preto	17:15:00
7	Voo	Ribeirão Preto	17:15:00	Congonhas (SP)	18:25:00
8	Voo	Ribeirão Preto	09:00:00	Congonhas (SP)	10:10:00
8	Conexão	Congonhas (SP)	10:10:00	Congonhas (SP)	10:40:00
8	Voo	Congonhas (SP)	10:40:00	Ribeirão Preto	11:50:00
8	Conexão	Ribeirão Preto	11:50:00	Ribeirão Preto	12:30:00
8	Voo	Ribeirão Preto	12:30:00	Brasília	14:15:00
8	Conexão	Brasília	14:15:00	Brasília	15:00:00
8	Voo	Brasília	15:00:00	Ribeirão Preto	16:45:00
8	Conexão	Ribeirão Preto	16:45:00	Ribeirão Preto	19:20:00
8	Voo	Ribeirão Preto	19:20:00	Guarulhos (SP)	20:40:00
8	Conexão	Guarulhos (SP)	20:40:00	Guarulhos (SP)	22:20:00
8	Voo	Guarulhos (SP)	22:20:00	Ribeirão Preto	23:35:00
9	Voo	Goiânia	07:00:00	Ribeirão Preto	08:30:00
9	Conexão	Ribeirão Preto	08:30:00	Ribeirão Preto	09:15:00

9	Voo	Ribeirão Preto	09:15:00	Santos Dumont (RJ)	10:45:00
9	Conexão	Santos Dumont (RJ)	10:45:00	Santos Dumont (RJ)	11:15:00
9	Voo	Santos Dumont (RJ)	11:15:00	Ribeirão Preto	13:05:00
9	Conexão	Ribeirão Preto	13:05:00	Ribeirão Preto	14:00:00
9	Voo	Ribeirão Preto	14:00:00	Congonhas (SP)	15:10:00
9	Conexão	Congonhas (SP)	15:10:00	Congonhas (SP)	18:55:00
9	Voo	Congonhas (SP)	18:55:00	Ribeirão Preto	20:05:00
9	Conexão	Ribeirão Preto	20:05:00	Ribeirão Preto	21:20:00
9	Voo	Ribeirão Preto	21:20:00	Goiânia	22:50:00

APÊNDICE C – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 1 E MODELO 2

AC	Finalidade	Origem	Horário de Partida	Destino	Horário de Chegada
0	Voo	São José do Rio Preto	06:05:00	Brasília	07:45:00
0	Conexão	Brasília	07:45:00	Brasília	11:35:00
0	Voo	Brasília	11:35:00	Araguaína	14:10:00
0	Conexão	Araguaína	14:10:00	Araguaína	15:55:00
0	Voo	Araguaína	15:55:00	Brasília	18:25:00
0	Conexão	Brasília	18:25:00	Brasília	21:15:00
0	Voo	Brasília	21:15:00	São José do Rio Preto	22:55:00
1	Voo	Ribeirão Preto	06:15:00	Guarulhos (SP)	07:35:00
1	Conexão	Guarulhos (SP)	07:35:00	Guarulhos (SP)	08:25:00
1	Voo	Guarulhos (SP)	08:25:00	São José do Rio Preto	10:05:00
1	Conexão	São José do Rio Preto	10:05:00	São José do Rio Preto	10:45:00
1	Voo	São José do Rio Preto	10:45:00	Guarulhos (SP)	12:35:00
1	Conexão	Guarulhos (SP)	12:35:00	Guarulhos (SP)	13:10:00
1	Voo	Guarulhos (SP)	13:10:00	Joinville	14:35:00
1	Conexão	Joinville	14:35:00	Joinville	15:05:00
1	Voo	Joinville	15:05:00	Guarulhos (SP)	16:40:00
1	Conexão	Guarulhos (SP)	16:40:00	Guarulhos (SP)	17:30:00
1	Voo	Guarulhos (SP)	17:30:00	São José do Rio Preto	19:10:00
1	Conexão	São José do Rio Preto	19:10:00	São José do Rio Preto	19:40:00
1	Voo	São José do Rio Preto	19:40:00	Guarulhos (SP)	21:30:00
1	Conexão	Guarulhos (SP)	21:30:00	Guarulhos (SP)	22:20:00
1	Voo	Guarulhos (SP)	22:20:00	Ribeirão Preto	23:35:00
2	Voo	Ribeirão Preto	07:00:00	Santos Dumont (RJ)	08:30:00
2	Conexão	Santos Dumont (RJ)	08:30:00	Santos Dumont (RJ)	11:15:00
2	Voo	Santos Dumont (RJ)	11:15:00	Ribeirão Preto	13:05:00
2	Conexão	Ribeirão Preto	13:05:00	Ribeirão Preto	15:30:00
2	Voo	Ribeirão Preto	15:30:00	Santos Dumont (RJ)	17:00:00
2	Conexão	Santos Dumont (RJ)	17:00:00	Santos Dumont (RJ)	17:45:00
2	Voo	Santos Dumont (RJ)	17:45:00	Ribeirão Preto	19:35:00
2	Conexão	Ribeirão Preto	19:35:00	Ribeirão Preto	20:05:00
2	Voo	Ribeirão Preto	20:05:00	Congonhas (SP)	21:15:00
2	Conexão	Congonhas (SP)	21:15:00	Congonhas (SP)	21:45:00
2	Voo	Congonhas (SP)	21:45:00	Ribeirão Preto	22:55:00
3	Voo	Goiânia	07:00:00	Ribeirão Preto	08:30:00
3	Conexão	Ribeirão Preto	08:30:00	Ribeirão Preto	09:00:00
3	Voo	Ribeirão Preto	09:00:00	Congonhas (SP)	10:10:00
3	Conexão	Congonhas (SP)	10:10:00	Congonhas (SP)	10:40:00
3	Voo	Congonhas (SP)	10:40:00	Ribeirão Preto	11:50:00

3	Conexão	Ribeirão Preto	11:50:00	Ribeirão Preto	12:30:00
3	Voo	Ribeirão Preto	12:30:00	Brasília	14:15:00
3	Conexão	Brasília	14:15:00	Brasília	15:00:00
3	Voo	Brasília	15:00:00	Ribeirão Preto	16:45:00
3	Conexão	Ribeirão Preto	16:45:00	Ribeirão Preto	17:15:00
3	Voo	Ribeirão Preto	17:15:00	Congonhas (SP)	18:25:00
3	Conexão	Congonhas (SP)	18:25:00	Congonhas (SP)	18:55:00
3	Voo	Congonhas (SP)	18:55:00	Ribeirão Preto	20:05:00
3	Conexão	Ribeirão Preto	20:05:00	Ribeirão Preto	21:20:00
3	Voo	Ribeirão Preto	21:20:00	Goiânia	22:50:00
4	Voo	Presidente Prudente	05:35:00	Guarulhos (SP)	07:20:00
4	Conexão	Guarulhos (SP)	07:20:00	Guarulhos (SP)	13:25:00
4	Voo	Guarulhos (SP)	13:25:00	Presidente Prudente	15:05:00
4	Conexão	Presidente Prudente	15:05:00	Presidente Prudente	15:35:00
4	Voo	Presidente Prudente	15:35:00	Guarulhos (SP)	17:05:00
4	Conexão	Guarulhos (SP)	17:05:00	Guarulhos (SP)	17:35:00
4	Voo	Guarulhos (SP)	17:35:00	Ribeirão Preto	18:50:00
4	Conexão	Ribeirão Preto	18:50:00	Ribeirão Preto	19:20:00
4	Voo	Ribeirão Preto	19:20:00	Guarulhos (SP)	20:40:00
4	Conexão	Guarulhos (SP)	20:40:00	Guarulhos (SP)	22:40:00
4	Voo	Guarulhos (SP)	22:40:00	Presidente Prudente	00:25:00

APÊNDICE D – TABELA DE VOOS GERADA PARA GRUPO 2 E MODELO 2

AC	Finalidade	Origem	Horário de Partida	Destino	Horário de Chegada
5	Voo	Goiânia	07:00:00	Ribeirão Preto	08:30:00
5	Conexão	Ribeirão Preto	08:30:00	Ribeirão Preto	09:00:00
5	Voo	Ribeirão Preto	09:00:00	Congonhas (SP)	10:10:00
5	Conexão	Congonhas (SP)	10:10:00	Congonhas (SP)	10:40:00
5	Voo	Congonhas (SP)	10:40:00	Ribeirão Preto	11:50:00
5	Conexão	Ribeirão Preto	11:50:00	Ribeirão Preto	12:30:00
5	Voo	Ribeirão Preto	12:30:00	Brasília	14:15:00
5	Conexão	Brasília	14:15:00	Brasília	15:00:00
5	Voo	Brasília	15:00:00	Ribeirão Preto	16:45:00
5	Conexão	Ribeirão Preto	16:45:00	Ribeirão Preto	17:15:00
5	Voo	Ribeirão Preto	17:15:00	Congonhas (SP)	18:25:00
5	Conexão	Congonhas (SP)	18:25:00	Congonhas (SP)	18:55:00
5	Voo	Congonhas (SP)	18:55:00	Ribeirão Preto	20:05:00
5	Conexão	Ribeirão Preto	20:05:00	Ribeirão Preto	21:20:00
5	Voo	Ribeirão Preto	21:20:00	Goiânia	22:50:00
6	Voo	Presidente Prudente	05:35:00	Guarulhos (SP)	07:20:00
6	Conexão	Guarulhos (SP)	07:20:00	Guarulhos (SP)	08:25:00
6	Voo	Guarulhos (SP)	08:25:00	São José do Rio Preto	10:05:00
6	Conexão	São José do Rio Preto	10:05:00	São José do Rio Preto	10:45:00
6	Voo	São José do Rio Preto	10:45:00	Guarulhos (SP)	12:35:00
6	Conexão	Guarulhos (SP)	12:35:00	Guarulhos (SP)	17:30:00
6	Voo	Guarulhos (SP)	17:30:00	São José do Rio Preto	19:10:00
6	Conexão	São José do Rio Preto	19:10:00	São José do Rio Preto	19:40:00
6	Voo	São José do Rio Preto	19:40:00	Guarulhos (SP)	21:30:00
6	Conexão	Guarulhos (SP)	21:30:00	Guarulhos (SP)	22:40:00
6	Voo	Guarulhos (SP)	22:40:00	Presidente Prudente	00:25:00
7	Voo	Ribeirão Preto	07:00:00	Santos Dumont (RJ)	08:30:00

7	Conexão	Santos Dumont (RJ)	08:30:00	Santos Dumont (RJ)	09:00:00
7	Voo	Santos Dumont (RJ)	09:00:00	Ribeirão Preto	10:50:00
7	Conexão	Ribeirão Preto	10:50:00	Ribeirão Preto	12:30:00
7	Voo	Ribeirão Preto	12:30:00	Santos Dumont (RJ)	14:00:00
7	Conexão	Santos Dumont (RJ)	14:00:00	Santos Dumont (RJ)	14:40:00
7	Voo	Santos Dumont (RJ)	14:40:00	Ribeirão Preto	16:30:00
7	Conexão	Ribeirão Preto	16:30:00	Ribeirão Preto	19:20:00
7	Voo	Ribeirão Preto	19:20:00	Guarulhos (SP)	20:40:00
7	Conexão	Guarulhos (SP)	20:40:00	Guarulhos (SP)	22:20:00
7	Voo	Guarulhos (SP)	22:20:00	Ribeirão Preto	23:35:00
8	Voo	Ribeirão Preto	12:00:00	Congonhas (SP)	13:10:00
8	Conexão	Congonhas (SP)	13:10:00	Congonhas (SP)	13:50:00
8	Voo	Congonhas (SP)	13:50:00	Ribeirão Preto	15:00:00
8	Conexão	Ribeirão Preto	15:00:00	Ribeirão Preto	15:30:00
8	Voo	Ribeirão Preto	15:30:00	Santos Dumont (RJ)	17:00:00
8	Conexão	Santos Dumont (RJ)	17:00:00	Santos Dumont (RJ)	17:45:00
8	Voo	Santos Dumont (RJ)	17:45:00	Ribeirão Preto	19:35:00
9	Voo	Ribeirão Preto	06:15:00	Guarulhos (SP)	07:35:00
9	Conexão	Guarulhos (SP)	07:35:00	Guarulhos (SP)	13:10:00
9	Voo	Guarulhos (SP)	13:10:00	Joinville	14:35:00
9	Conexão	Joinville	14:35:00	Joinville	15:05:00
9	Voo	Joinville	15:05:00	Guarulhos (SP)	16:40:00
9	Conexão	Guarulhos (SP)	16:40:00	Guarulhos (SP)	17:35:00
9	Voo	Guarulhos (SP)	17:35:00	Ribeirão Preto	18:50:00
9	Conexão	Ribeirão Preto	18:50:00	Ribeirão Preto	20:05:00
9	Voo	Ribeirão Preto	20:05:00	Congonhas (SP)	21:15:00
9	Conexão	Congonhas (SP)	21:15:00	Congonhas (SP)	21:45:00
9	Voo	Congonhas (SP)	21:45:00	Ribeirão Preto	22:55:00

APÊNDICE E – TABELA DOS HORÁRIOS DE VOO ENTRE PARES O-D

Código de Origem	Cidade de Origem	Horário de Partida	Código de Destino	Cidade de Destino	Horário de Chegada
PPB1	Presidente Prudente	05:35:00	GRU1	São Paulo (GRU)	07:20:00
SJP1	São José do Rio Preto	06:05:00	BSB1	Brasília	07:45:00
RAO1	Ribeirão Preto	06:15:00	GRU2	São Paulo (GRU)	07:35:00
UDI1	Uberlândia	06:30:00	BSB1	Brasília	07:45:00
GYN1	Goiânia	07:00:00	RAO1	Ribeirão Preto	08:30:00
RAO2	Ribeirão Preto	07:00:00	SDU1	Rio de Janeiro (SDU)	08:30:00
CGH1	São Paulo (CGH)	07:20:00	RAO2	Ribeirão Preto	08:30:00
GRU1	São Paulo (GRU)	08:25:00	RAO3	Ribeirão Preto	09:40:00
GRU1	São Paulo (GRU)	08:25:00	ARU1	Araçatuba	10:05:00
GRU1	São Paulo (GRU)	08:25:00	CFB1	Cabo Frio	10:05:00
GRU1	São Paulo (GRU)	08:25:00	SJP1	São José do Rio Preto	10:05:00
RAO3	Ribeirão Preto	08:30:00	SDU2	Rio de Janeiro (SDU)	10:00:00
SDU1	Rio de Janeiro (SDU)	09:00:00	RAO4	Ribeirão Preto	10:50:00
RAO4	Ribeirão Preto	09:00:00	CGH1	São Paulo (CGH)	10:10:00
RAO5	Ribeirão Preto	09:15:00	SDU3	Rio de Janeiro (SDU)	10:45:00
ARU1	Araçatuba	10:35:00	GRU4	São Paulo (GRU)	12:15:00
CFB1	Cabo Frio	10:35:00	GRU3	São Paulo (GRU)	12:05:00
SDU2	Rio de Janeiro (SDU)	10:40:00	RAO6	Ribeirão Preto	12:30:00
CGH2	São Paulo (CGH)	10:40:00	RAO5	Ribeirão Preto	11:50:00
SJP2	São José do Rio Preto	10:45:00	GRU5	São Paulo (GRU)	12:35:00
SDU3	Rio de Janeiro (SDU)	11:15:00	RAO7	Ribeirão Preto	13:05:00
RAO6	Ribeirão Preto	11:15:00	GRU5	São Paulo (GRU)	12:35:00
BSB1	Brasília	11:35:00	AUX1	Araguaína	14:10:00
RAO7	Ribeirão Preto	12:00:00	CGH2	São Paulo (CGH)	13:10:00
RAO8	Ribeirão Preto	12:30:00	SDU4	Rio de Janeiro (SDU)	14:00:00
RAO9	Ribeirão Preto	12:30:00	BSB3	Brasília	14:15:00
RAO10	Ribeirão Preto	13:00:00	CGH3	São Paulo (CGH)	14:10:00
GRU5	São Paulo (GRU)	13:10:00	JOI1	Joinville	14:35:00
GRU5	São Paulo (GRU)	13:10:00	CFB2	Cabo Frio	14:50:00
GRU7	São Paulo (GRU)	13:25:00	PPB2	Presidente Prudente	15:05:00
CGH3	São Paulo (CGH)	13:50:00	RAO8	Ribeirão Preto	15:00:00
RAO11	Ribeirão Preto	14:00:00	CGH4	São Paulo (CGH)	15:10:00
SDU4	Rio de Janeiro (SDU)	14:40:00	RAO10	Ribeirão Preto	16:30:00
CGH4	São Paulo (CGH)	14:40:00	RAO9	Ribeirão Preto	15:50:00
BSB2	Brasília	15:00:00	RAO11	Ribeirão Preto	16:45:00
JOI1	Joinville	15:05:00	GRU7	São Paulo (GRU)	16:40:00
CFB2	Cabo Frio	15:20:00	GRU8	São Paulo (GRU)	16:50:00
RAO12	Ribeirão Preto	15:30:00	SDU5	Rio de Janeiro (SDU)	17:00:00
PPB2	Presidente Prudente	15:35:00	GRU9	São Paulo (GRU)	17:05:00

Código de Origem	Cidade de Origem	Horário de Partida	Código de Destino	Cidade de Destino	Horário de Chegada
AUX1	Araguaína	15:55:00	BSB4	Brasília	18:25:00
RAO13	Ribeirão Preto	16:30:00	VIX1	Vitória	18:25:00
RAO14	Ribeirão Preto	17:15:00	CGH5	São Paulo (CGH)	18:25:00
GRU8	São Paulo (GRU)	17:20:00	CFB3	Cabo Frio	19:00:00
GRU8	São Paulo (GRU)	17:20:00	IZA1	Goianá	19:05:00
GRU10	São Paulo (GRU)	17:30:00	SJP2	São José do Rio Preto	19:10:00
GRU11	São Paulo (GRU)	17:35:00	RAO12	Ribeirão Preto	18:50:00
SDU5	Rio de Janeiro (SDU)	17:45:00	RAO13	Ribeirão Preto	19:35:00
CGH5	São Paulo (CGH)	18:55:00	RAO14	Ribeirão Preto	20:05:00
VIX1	Vitória	18:55:00	RAO15	Ribeirão Preto	20:50:00
RAO15	Ribeirão Preto	19:20:00	GRU10	São Paulo (GRU)	20:40:00
CFB3	Cabo Frio	19:30:00	GRU11	São Paulo (GRU)	21:00:00
IZA1	Goianá	19:35:00	GRU12	São Paulo (GRU)	21:15:00
SJP3	São José do Rio Preto	19:40:00	GRU13	São Paulo (GRU)	21:30:00
RAO16	Ribeirão Preto	20:05:00	CGH6	São Paulo (CGH)	21:15:00
BSB3	Brasília	21:15:00	UDI1	Uberlândia	22:25:00
BSB3	Brasília	21:15:00	SJP3	São José do Rio Preto	22:55:00
RAO17	Ribeirão Preto	21:20:00	GYN1	Goiânia	22:50:00
CGH6	São Paulo (CGH)	21:45:00	RAO16	Ribeirão Preto	22:55:00
GRU12	São Paulo (GRU)	22:20:00	RAO17	Ribeirão Preto	23:35:00
GRU13	São Paulo (GRU)	22:40:00	PPB1	Presidente Prudente	00:25:00

APÊNDICE F – PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO GENÉTICO

Enquanto Tempo de Execução < 48 horas:

Inicialize o AG:

Inicialize População Inicial;

Enquanto Geração < 20:

Selecione dois Pais por Torneio;

Se Taxa de Reprodução \leq 80%:

Realize *Crossover* dos cromossomos;

Gere dois novos cromossomos;

Se Taxa de Mutação \leq 1%:

Escolha um gene aleatório de um dos cromossomos;

Altere o valor do alelo do gene aleatório;

Para cada cromossomo, de cada Pai:

Se substituir cromossomo do Pai por um dos novos cromossomos resulta em adição de novo voo à sua programação E mantém a ciclicidade da sua programação:

Se novo voo pertence à programação de voos de outra aeronave:

Retire o voo da programação de voos da outra aeronave;

Substitua o cromossomo do pai pelo novo cromossomo;

Se a aptidão geral NÃO melhorar:

Retorne à programação de voos original;

Geração = Geração + 1

Inclua o voo inicial na programação de cada aeronave

Retorne a Programação de Voos de todas as aeronaves;

Se Aptidão de Nova Programação de Voos for melhor que a Aptidão da Programação de Voos Anterior:

Programação de Voos Anterior = Nova Programação de Voos