



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Abordagem em Algoritmos Genéticos para
Otimização da Alocação de Slots no Programa de
Opções de Trajetórias Colaborativo**

Natan de Souza Rodrigues

Dissertação apresentada como requisito parcial para
conclusão do Mestrado em Informática

Orientador
Prof. Dr. Li Weigang

Brasília
2018

Universidade de Brasília — UnB
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Mestrado

Coordenador: Prof. Dr. Bruno Luiggi Macchiavello Espinoza

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Li Weigang (Orientador) — CIC/UnB
Prof.a Dr.a Mýlene Christine Queiroz de Farias — ENE/UnB
Prof. Dr. João Batista Camargo Junior — POLI/USP
Prof. Dr. Vinícius Ruela Pereira Borges — CIC/UnB

CIP — Catalogação Internacional na Publicação

Rodrigues, Natan de Souza.

Abordagem em Algoritmos Genéticos para Otimização da Alocação de Slots no Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo / Natan de Souza Rodrigues. Brasília : UnB, 2018.

144 p. : il. ; 29,5 cm.

Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

1. ATM, 2. CTOP, 3. Algoritmos Genéticos, 4. Inteligência Artificial,
5. Sistemas de Suporte à Decisão

CDU 004

Endereço: Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro — Asa Norte
CEP 70910-900
Brasília-DF — Brasil



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Abordagem em Algoritmos Genéticos para
Otimização da Alocação de Slots no Programa de
Opções de Trajetórias Colaborativo**

Natan de Souza Rodrigues

Dissertação apresentada como requisito parcial para
conclusão do Mestrado em Informática

Prof. Dr. Li Weigang (Orientador)
CIC/UnB

Prof.a Dr.a Mýlene Christine Queiroz de Farias Prof. Dr. João Batista Camargo Junior
ENE/UnB POLI/USP

Prof. Dr. Vinícius Ruela Pereira Borges
CIC/UnB

Prof. Dr. Bruno Luigi Macchiavello Espinoza
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Informática

Brasília, 07 de Junho de 2018

Ficha Catalográfica de Teses e Dissertações

Esta página existe apenas para indicar onde a ficha catalográfica gerada para dissertações de mestrado e teses de doutorado defendidas na UnB. A Biblioteca Central é responsável pela ficha, mais informações nos sítios:

<http://www.bce.unb.br>

<http://www.bce.unb.br/elaboracao-de-fichas-catalograficas-de-teses-e-dissertacoes>

Esta página não deve ser incluída na versão final do texto.

Dedicatória

Aos meus pais, pela forma como me ensinaram a realizar meus sonhos e alcançar meus objetivos.

Agradecimentos

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Li Weigang pela orientação e suporte durante esta pesquisa e pelas oportunidades proporcionadas que são de grande valia para meu crescimento acadêmico e profissional. Agradeço imensamente ao Dr. Leonardo Cruciol pelo incentivo e por acreditar em meu trabalho, orientando e apoiando em cada etapa desta pesquisa.

Agradeço ao corpo docente do Departamento de Ciência da Computação (CIC) pelas aulas ministradas e pela oportunidade de aprendizado durante minha trajetória na Universidade de Brasília (UnB), em especial às doutoras Alba Cristina M. de Melo e Célia Ghedini Ralha pelo apoio desde a graduação.

Agradeço novamente aos doutores Li Weigang e Leonardo Cruciol pelo auxílio e desenvolvimento do trabalho *A Genetic Algorithm Model for Slot Allocation Optimization to Brazilian CTOP Approach*, aprovado na *15th International Conference on Distributed Computing and Artificial Intelligence 2018* (DCAI 2018).

Agradeço a todos meus familiares e amigos que me apoiaram durante esta etapa acadêmica.

Resumo

Seguindo a evolução de métodos e recursos que sustentam a fluidez, eficiência e segurança do gerenciamento de tráfego aéreo, está em operação no espaço aéreo norte-americano o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP), lançado pela Administração Federal de Aviação dos EUA (*Federal Aviation Administration*) (FAA), que possibilita à cada companhia aérea compartilhar suas opções de rota de voo para o centro de controle de tráfego aéreo e, assim, alcançar melhores objetivos de negócios e reduzir os custos operacionais estratégicos.

No Brasil, acompanhando a evolução do gerenciamento de tráfego aéreo, há esforços e estudos iniciais para verificação dos benefícios da implementação do CTOP para melhorar a fluência do tráfego aéreo, diminuindo os atrasos, ampliando a segurança e incrementando os resultados financeiros das companhias aéreas.

Com base na verificação dos estudos de implementação dessa iniciativa, encontrou-se a oportunidade de otimizar as operações realizadas na alocação de voos e *slots* com justificativa no problema de atrasos dos voos capturados no CTOP.

Esta dissertação apresenta uma solução computacional para o espaço aéreo brasileiro utilizando Algoritmos Genéticos para diminuição do atraso entre os slots disponíveis durante determinada demanda CTOP. Esta otimização de *slots* também mantém uma janela de separação de segurança de cada aeronave em rota.

Nos cenários apresentados durante o estudo de caso, quando utilizado este sistema de apoio à decisão pela autoridade de controle de tráfego aéreo, foi possível uma redução de 89 % do atraso geral dos voos e de 96% do atraso de determinada companhia aérea.

Palavras-chave: ATM, CTOP, Algoritmos Genéticos, Inteligência Artificial, Sistemas de Suporte à Decisão

Abstract

The Collaborative Trajectory Options Program (CTOP) makes each airline possible to share its route options to air traffic control center, and so achieve better business goals by reducing strategic operational costs.

In Brazil, there are initial efforts to verify the benefits of CTOP implementation to improve the air traffic fluency and financial results.

Based on the implementation of studies of this initiative in Brazil, there was the problem of delays between the slots in the allocation step of the CTOP flights.

This research presents a novel approach for Brazilian airspace using Genetic Algorithms to decrease the delay between available slots during CTOP.

The slot optimization keeps improving in a safety-separating window of each aircraft en route. The case study presented a reduction about 89% of the general airspace delay and 96% of delay of a certain airline, when used this decision support system by air traffic control authority.

Keywords: ATM, CTOP, Genetic Algorithms, Artificial Intelligence, Decision Support Systems

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Motivação	18
1.2	Definição do Problema	19
1.3	Justificativa	20
1.4	Objetivos	23
1.5	Metodologia de Pesquisa	23
1.5.1	Revisão Bibliográfica	23
1.5.2	Coleta e Levantamento de Dados	24
1.5.3	Aplicação, Estudo de Caso e Resultados	24
1.6	Organização do Trabalho	25
2	Algoritmos Genéticos	26
2.1	História	26
2.2	Definições	27
2.3	Estrutura e Funcionamento do AG	28
2.3.1	Representação e Inicialização do Algoritmo	28
2.3.2	Avaliação	28
2.3.3	Seleção	29
2.3.4	Operadores Genéticos	32
2.3.5	Substituição	35
2.3.6	Funcionamento do Algoritmo Genético	36
2.4	Aplicações dos Algoritmos Genéticos	39
2.4.1	Otimização em AG com Elitismo na Definição de Rotas de Transporte Público.	39
2.4.2	Otimização do Projeto de Aeronaves com AG	40
3	Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM)	42
3.1	<i>Air Traffic Management</i> (ATM)	42
3.1.1	Espaço Aéreo Brasileiro	43

3.1.2	ATFM no Espaço Aéreo Brasileiro	44
3.2	Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo	47
3.2.1	Conjunto de Opções de Trajetória (TOS)	49
4	Modelos Computacionais em ATM	52
4.1	Tomada de Decisão de Partidas em Aeroportos Utilizando Algoritmos Ge- néticos	52
4.2	Abordagem <i>Greedy</i> no CTOP	55
4.3	Modelo Utilizando Teoria dos Jogos para Sugestão de Trajetórias no CTOP	59
4.4	Teoria dos Jogos para Otimização de Alocação de <i>Slots</i> no CTOP	63
5	Modelagem	69
5.1	Utilização do CTOP no Espaço Aéreo do Brasil.	69
5.2	Aplicação do CTOP para Alocação de <i>Slots</i>	70
5.3	Proposta de Algoritmo Genético para Otimização da Alocação de <i>Slots</i> no CTOP	71
5.4	Modelagem e Representação do Algoritmo Genético	73
5.4.1	Gene	73
5.4.2	Cromossomo ou Indivíduo	74
5.4.3	População	74
5.4.4	Operadores Genéticos	75
5.4.5	Função de Aptidão (<i>Fitness</i>)	76
5.4.6	Algoritmo da Proposta de AG	76
5.5	Otimização com Algoritmos Genéticos na Aplicação do CTOP	77
6	Arquitetura e Implementação	80
6.1	Definições e Detalhamento do Sistema	80
6.2	Aplicação de Alocação do CTOP	80
6.3	Aplicação de Otimização de <i>slots</i> com AG	83
6.4	Banco de Dados	86
7	Estudo de Caso	90
7.1	Ambiente Computacional de Testes	90
7.2	Cenários	90
7.2.1	Parâmetros Preliminares para Execução da Aplicação do CTOP	91
7.2.2	Parâmetros Preliminares para Execução da Aplicação do CTOP com Otimização em AG	95
7.3	Execução	96
7.3.1	Validação da Aplicação do CTOP com Otimização em AG	96

7.4 Resultados Obtidos	104
7.4.1 Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B	104
7.4.2 Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B	108
7.4.3 Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B	112
7.4.4 Desempenho	116
8 Conclusão	118
8.1 Análise Conclusiva	118
8.2 Proposta de Pesquisa Futura	120
Referências	122
Apêndice	124
A Voos Utilizados no Estudo de Caso	125
B Voos Utilizados no Estudo de Caso Ordenados por IAT	130
C Voos Não Alocados Utilizados no Estudo de Caso	135
D Atraso dos Voos Durante as Gerações	139

Lista de Figuras

1.1	Representação da organização do espaço aéreo norte-americano. [1]	21
2.1	Método da Roleta. [2]	30
2.2	Tipos de Cruzamento.	33
2.3	Indivíduo antes e após a aplicação do operador de mutação.	34
2.4	Passos do AG genérico.	37
2.5	Modificação de uma rota após mutação no AG.	40
2.6	Otimização do tamanho da envergadura da asa da aeronave durante as gerações do algoritmo.	41
3.1	Espaço aéreo brasileiro. [3]	44
3.2	ARTCC no espaço aéreo norte-americano. [4]	48
3.3	Exemplo do CTOP. [4]	49
3.4	Exemplo de TOS. [5]	50
4.1	Fluxograma da proposta de solução utilizada. [6]	54
4.2	Procedimento de adaptação. [5]	56
4.3	Árvore de busca agrupada por FCA. [5]	56
4.4	Algoritmo de busca utilizado na pesquisa <i>greedy</i> [5]	57
4.5	Comparação entre as soluções utilizadas. [5]	58
4.6	Representação geral do modelo utilizado. [4]	59
4.7	Representação geral dos casos e cenários. [4]	60
4.8	Comparativo do atraso em minutos em cada abordagem. [4]	62
4.9	Média dos atrasos globais. [7]	67
4.10	Média dos atrasos de voos prioritários. [7]	67
5.1	Modelo da Aplicação do CTOP.	72
5.2	Estrutura dos genes e cromossomos.	74
5.3	Estrutura dos cromossomos e população.	74
5.4	Modelo da Aplicação de Otimização do CTOP com Algoritmos Genéticos.	79

6.1	Arquitetura da Aplicação do CTOP.	81
6.2	Captura de tela da carga dos voos e escolha da distribuição de voos.	82
6.3	Captura de tela da definição dos <i>slots</i>	82
6.4	Captura de tela com a lista de voos ordenados por IAT.	83
6.5	Captura de tela com a lista final de voos alocados.	84
6.6	Arquitetura da Aplicação de Otimização de <i>slots</i> com AG.	85
6.7	Captura de tela da Tela utilizada para definir as gerações e iniciar o AG.	85
6.8	Captura de tela com o resumo das gerações durante a execução do AG.	86
6.9	Captura de tela com o conjunto ótimo de <i>slots</i> obtido pelo AG.	87
6.10	Modelo Entidade Relacionamento do Algoritmo do CTOP.	88
6.11	Modelo Entidade Relacionamento do Algoritmo do CTOP com a otimização de AG.	89
7.1	Voos partindo de 9 aeroportos brasileiros e duas FCAs.	92
7.2	Proporção de chegadas de voos por faixa de horário no Aeroporto Internacional de Guarulhos - Governador André Franco Montoro (GRU).	93
7.3	Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário de Pico.	105
7.4	Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário de Pico.	106
7.5	Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário Normal.	107
7.6	Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário Normal.	108
7.7	Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário de Pico.	109
7.8	Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário de Pico	110
7.9	Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário Normal.	111
7.10	Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário Normal.	112
7.11	Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário de Pico.	113
7.12	Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário de Pico.	114
7.13	Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário Normal.	115

7.14 Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário Normal.	116
7.15 Médias dos tempos de execução dos cenários e subcenários durante o estudo de caso.	117

Lista de Tabelas

2.1	Exemplo de <i>strings</i> e os valores de <i>fitness</i>	30
4.1	Execução da abordagem em situações distintas, horário de pico e horário normal. [6]	55
4.2	Melhores resultados dos Atrasos Prioritários com Teoria dos Jogos. (<i>Com adaptações</i>) [7]	68
7.1	Capacidade de cada FCA por faixa de tempo.	93
7.2	Voos capturados no CTOP com chegada entre 16h e 20.	97
7.3	<i>Slots</i> disponíveis no início da execução da Aplicação.	98
7.4	Voos ordenados por IAT.	98
7.5	Melhor conjunto de <i>slots</i> disponíveis após a execução da Aplicação.	100
7.6	Voos alocados no melhor conjunto de <i>slots</i>	100
7.7	Voos não alocados.	102
7.8	Atraso, em minutos, na geração inicial e na melhor geração da Aplicação.	103
7.9	Atrasos e alocação dos voos durante as gerações.	103
7.10	Média do tempo de execução por cenário	117
A.1	Voos capturados no CTOP com chegada entre 16h e 20.	125
B.1	Voos ordenados por IAT.	130
C.1	Voos não alocados.	135
D.1	Atrasos e alocação dos voos durante as gerações.	139

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACC Centro de Controle de Área (*Area Control Center*).

AG Algoritmo Genético.

AGs Algoritmos Genéticos.

ANAC Agência Nacional de Aviação Civil.

APP Controle de Aproximação (*Approach Center*).

ATFM Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*).

ATM Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*).

BSB Aeroporto Internacional de Brasília - Presidente Juscelino Kubitschek.

CGH Aeroporto de Congonhas - Deputado Freitas Nobre.

CGNA Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea.

CNF Aeroporto Internacional Belo Horizonte-Confins - Tancredo Neves.

CTOP Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*).

DECEA Departamento de Controle do Espaço Aéreo.

DFW *Dallas/Fort Worth International Airport*.

DSS Sistema de Suporte à Decisão (*Decision Support System*).

EAT *Earliest Arrival Time*.

EUA Estados Unidos da América.

EWR *Newark Liberty International Airport*.

FAA Administração Federal de Aviação dos EUA (*Federal Aviation Administration*).

FCA Área Restrita de Fluxo (*Flow Constrained Area*).

FOR Aeroporto Internacional de Fortaleza - Pinto Martins.

GRU Aeroporto Internacional de Guarulhos - Governador André Franco Montoro.

GYN Aeroporto Internacional de Goiânia - Santa Genoveva.

HOTRAN Horário de Transporte.

IAT *Initial Arrival Time*.

JFK *John F. Kennedy International Airport*.

LAX *Los Angeles International Airport*.

LGA *Airport LaGuardia*.

MER Modelo Entidade Relacionamento.

MySQL *My Structured Query Language*.

NAS *National Airspace System*.

NextGen *Next Generation Air Transportation System*.

OACI Organização da Aviação Civil Internacional.

REC Aeroporto Internacional de Recife - Gilberto Freyre.

SSA Aeroporto Internacional de Salvador - Luiz Eduardo Magalhães.

THE Aeroporto de Teresina - Senador Petrônio Portella.

TOS Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set*).

TransLab Laboratório de Modelo Computacional para Transporte Aéreo de Universidade de Brasília.

TRM *Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport*.

Capítulo 1

Introdução

Há um crescimento da informação, conectividade e acesso aos meios de transporte aéreos em vários países, inclusive no Brasil, sendo confirmado com os dados de movimentos operacionais de aeroportos no Brasil [8] e as informações do crescimento da utilização de transporte aéreos resultante de grandes eventos realizados no Brasil nos últimos anos [9].

Juntamente com o crescimento do tráfego aéreo também houve o crescimento dos dados gerados pelo gerenciamento de tráfego aéreo e também a robustez e complexidade dos sistemas utilizados para gerenciamento, resultante da necessidade de um controle de tráfego mais seguro, abrangente e preciso.

Com esse crescimento de fluxo de aeronaves e utilização de aeroportos em todo o mundo, logo também surge a necessidade de utilização e desenvolvimento de métodos que auxiliem na tomada de decisões, para então manter a eficiência e segurança do Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*) (ATFM), auxiliando de forma geral todos os envolvidos no ATFM, como, empresas aéreas e órgãos de controle e fiscalização.

1.1 Motivação

Surgiu nos Estados Unidos da América (EUA) o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP), um programa que busca um melhor resultado de negócios pelos usuários e companhias aéreas do espaço aéreo norte-americano, permitindo o envio de preferência de rotas pelas companhias aéreas para o órgão responsável quando ocorrer alguma restrição na capacidade de voos em determinada área. As preferências de rotas são enviadas para o órgão responsável, Administração Federal de Aviação dos EUA (*Federal Aviation Administration*) (FAA), por meio do Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set*) (TOS).

Conforme horários e trajetórias, alguns voos são capturados para receberem as restrições do CTOP e então, após receber o TOS pela companhia aérea, o órgão responsável determina a ordem final dos voos utilizando um algoritmo geral de alocação de *slots*. No entanto, há a possibilidade de otimização desse algoritmo responsável pela geração da ordem final dos voos, diminuindo a ocorrência de atrasos para as companhias aéreas.

Por seguir o crescimento do tráfego aéreo em outros países, o Brasil também necessita da criação e desenvolvimento de métodos e programas que auxiliem o ATFM no espaço aéreo brasileiro. Seguindo essa premissa podemos propor a utilização do CTOP no espaço aéreo brasileiro auxiliando as companhias aéreas e todos os envolvidos, buscando os objetivos semelhantes à aplicação do programa nos EUA.

A presente proposta de dissertação de mestrado visa o projeto de uma proposta para o ATFM utilizando Algoritmo Genético que busque uma melhor distribuição de *slots* por intervalo de tempo e os melhores horários de *slots* dos voos capturados do CTOP, ambientado no espaço aéreo brasileiro, possibilitando no fim da alocação de *slots* um menor atraso de voos das companhias aéreas capturados no CTOP.

1.2 Definição do Problema

O domínio de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*) (ATM) consiste em um complexo processo de tomada de decisões em tempo real que aumentam a complexidade de análise e decisão. Atualmente as decisões são tomadas por controladores de voos e especialistas de companhias aéreas, os quais convivem com elevada carga de pressão sob o impacto de suas decisões, pois têm pouco tempo para analisar e agir. Com o envolvimento de situações que têm como base a segurança e os riscos do espaço aéreo, são realizadas avaliações antecipadas das ações a serem tomadas e os impactos resultantes das ações aplicadas. Com base nessas premissas, os Sistema de Suporte à Decisão (*Decision Support System*) (DSS) são ferramentas fundamentais e bastante úteis para auxiliar esse processo realizado por especialistas.

Porém, em situações complexas, como o cenário de gerenciamento de tráfego aéreo, o ser humano é suscetível à falhas e erros. Logo, há uma vantagem dos sistemas em comparação com os seres humanos quando há a necessidade de obter pontos como velocidade, paralelismo e uma grande quantidade de informações de maneira precisa e objetiva. Assim, é importante que o sistema de apoio à decisão auxilie e combine as habilidades dos seres humanos e computadores.

Constantemente os processos de controle de tráfego aéreo são criados ou otimizados, sendo esses geralmente inseridos em programas de procedimentos pelos órgãos responsáveis pelo gerenciamento e controle de tráfego aéreo. O CTOP é um desses programas, possi-

bilitando um ganho nos resultados de negócios das companhias aéreas, quando ocorrem restrições na quantidade de voos em um determinada área, permitindo o envio das preferências de rotas de cada voo para o controle de tráfego aéreo. [10]. Por ser um programa novo no ramo de ATM, o CTOP está em prática nos EUA há pouco tempo possibilitando o surgimento de novas abordagens para os problemas que vêm sendo encontrados.

Indiferente dos EUA, o conceito de CTOP também pode ser aplicado no espaço aéreo brasileiro, e juntamente com essa aplicação poderá surgir o problema de sugestão de trajetórias pelas companhias aéreas, onde há o problema de classificação da quantidade de trajetórias que serão enviadas para cada voo capturado, de maneira dinâmica no início do CTOP. Por ser também uma solução importante que combina a alteração de rotas e o horário dos *slots* em tomadas de decisões, outros países também poderiam fazer a utilização dessa mesma abordagem, no entanto com algumas adequações.

1.3 Justificativa

Ao longo do tempo, a inteligência artificial tem investigado e proposto uma série de métodos de busca em vastos domínios, de modo a auxiliar na busca e otimização de um dado objetivo a partir de uma meta [11] [12]. De acordo com o autor em [13], uma variedade de métodos são utilizados para analisar e gerar diferentes tipos de decisão em um DSS, como, busca por informações em base de dados, análise de cenários e dados, redes neurais, modelagem cognitivas entre outros.

Segundo os autores em [13], os DSS podem se basear em métodos de Inteligência Artificial, auxiliando na resolução de problemas e tarefas. Logo, seguindo essa premissa a composição e implementação da solução do problema apresentado nesta dissertação tem como base um método de Algoritmo Genético para construção do modelo da proposta de solução. O problema considerado será a busca de um conjunto de *slots* ótimo para alocação geral de voos capturados no CTOP, um programa disponível no ATM.

O ATM é responsável, por verificar e analisar as situações de riscos derivadas de sobrecargas de aeronaves em determinada área do espaço aéreo, analisar condições meteorológicas entre aeroportos de determinada rota aérea, verificar questões como planejamento e sobrecarga da infraestrutura aeroportuária e dentre outras. Vários programas para tratar essas questões são implementados no ATM, sempre com o objetivo de elevar o nível de segurança no espaço aéreo considerando outros fatores operacionais, como atrasos e cancelamentos de voos, preferências de companhias aéreas, dentre outros.

O órgão responsável pelo controle de tráfego aéreo nos EUA, a FAA, em 2012, mostrou um plano de implementação da iniciativa *Next Generation Air Transportation System* (NextGen), com o objetivo de aprimorar o gerenciamento e outras atividades relacionadas

ao *National Airspace System* (NAS) [14]. Integrado ao NextGen, a FAA lançou o *CTOP*, com o objetivo da melhora do ATM, englobando os usuários do NAS e seus objetivos de negócios e as restrições do espaço aéreo, tornando todo esse processo mais estável negocialmente e flexível, pois permite o envio das preferências de rotas pelas companhias aéreas com voos envolvidos no CTOP.

O CTOP ficou em testes até março de 2014, após esse período foi colocado em uso no espaço aéreo norte-americano pela FAA [15].

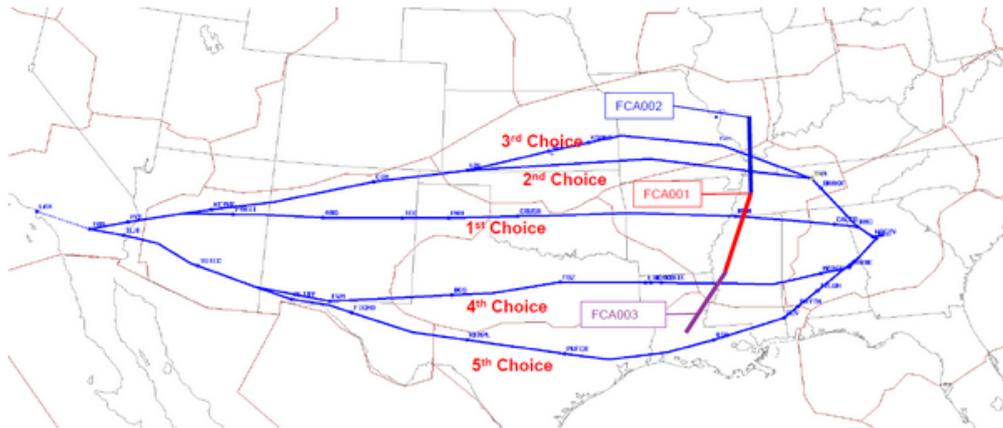


Figura 1.1: Representação da organização do espaço aéreo norte-americano. [1]

Conforme a Figura 1.1 [16], podemos verificar uma representação da utilização do CTOP no espaço aéreo norte-americano, onde há cinco possíveis rotas entre dois aeroportos, sendo o primeiro aeroporto *Los Angeles International Airport (LAX)* e o segundo *Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport (TRM)*. Também podemos verificar na Figura 1.1, a existência de três Áreas Restritas de Fluxo (*Flow Constrained Area*) (FCA), que limitam a capacidade de aeronaves que passarão pela área determinada em certa faixa de horário, sendo que cada FCA tem suas próprias restrições e essa capacidade é gerenciada de acordo com a demanda existente, essa fiscalização e gerenciamento é executada por um órgão de controle responsável.

Um dos objetivos do CTOP é a possibilidade de menor insatisfação das companhias aéreas após a interferência do órgão de controle, pois assim é possível o envio de preferências de rotas alternativas por essas companhias aéreas para os órgãos de controle por meio do TOS. Utilizando o TOS é possível que cada companhia envie um conjunto de opções de trajetórias de voo que seja passível de restrição para o órgão de controle, e então com essas informações, as decisões considerando as restrições existentes em cada FCA e os negócios de cada companhia podem ser tomadas pelo órgão de controle.

Seguindo essa premissa, há a necessidade de que cada companhia aérea no ambiente do CTOP possua uma ferramenta que possibilite a realização de estimativas com base na incerteza englobada no CTOP e que possa realizar o problema de envio da quantidade de

trajetórias de determinado voo para o órgão de controle, assim possibilitando e justificando a apresentação de uma solução DSS para resolução de problemas neste cenário, utilizando algoritmos de Inteligência Artificial para estimativa de riscos e rotas envolvidos no CTOP.

Porém, será considerado na solução que cada companhia aérea tenha apenas informações sobre os seus voos e o ponto principal da solução será o impacto financeiro para a escolhas das rotas que serão enviadas ao órgão de controle, ou seja, a definição da estratégia também poderá ajudar na disponibilização de um cenário que ofereça um menor custo para a companhia aérea, com base em custos operacionais, custos de tripulação e de voos.

Uma solução para este problema do envio de preferências de rotas de voos envolvidos no CTOP pelas companhias aéreas para os órgãos de controle já foi desenvolvida utilizando algoritmos de busca *greedy* [5] e com Teoria dos jogos [4].

No primeiro caso os autores conseguiram desenvolver um modelo teórico ótimo, onde estes não utilizaram premissas reais para resolução, pois foi considerado que na disputa por **slots** uma Companhia Aérea A sempre tem prioridade para escolher quais as melhores trajetórias, logo a Companhia Aérea B só receberá aquele *slot* se a Companhia Aérea B não quiser. Contudo, esses resultados não seriam alcançados na prática.

No modelo utilizando Teoria dos jogos, ao utilizar dados reais, o autor obteve um ganho considerável ao comparar sua solução com a solução que utiliza a abordagem *greedy*, reduzindo o atraso em aproximadamente 527 horas de voo. No entanto, o autor considerou apenas os atrasos para determinação da rotas a serem enviadas aplicando o estudo somente no espaço aéreo norte-americano.

Assim, com os modelos e técnicas computacionais apresentados, a proposta desta dissertação de mestrado é a elaboração de um solução utilizando algoritmos genéticos que otimize a alocação geral de *slots* ambientando o CTOP aplicado no Brasil, etapa realizada pelo órgão responsável de alocação de *slots*, gerando assim um menor atraso para os agentes envolvidos em todo espaço aéreo brasileiro, tais como companhias aéreas e órgãos de controle responsáveis.

Para elaboração da solução proposta, serão utilizados algoritmos genéticos, onde cada geração do algoritmo será um conjunto de *slots* de voos capturados no CTOP. Assim, será feita a busca de um conjunto de *slots* ótimo no decorrer das gerações, disponibilizando no final do algoritmo a solução pretendida que gere um menor atraso na alocação de *slots* e consequentemente reduzindo os custos operacionais das companhias aéreas.

1.4 Objetivos

Objetivo geral

O objetivo geral dessa dissertação de mestrado é a otimização da solução de alocação geral de *slots* no CTOP, já existente na literatura. Será desenvolvida uma solução com Algoritmos Genéticos para buscar um conjunto de *slots* ótimo, e assim gerar um menor atraso nos voos para as companhias aéreas e órgãos de fiscalização.

Objetivos Específicos

Alguns objetivos específicos serão definidos para então obtermos o objetivo geral dessa dissertação, assim podemos destacar:

- Introdução do conceito de CTOP utilizando informações do espaço aéreo brasileiro.
- Projeção e desenvolvimento de um sistema protótipo que receba dados e informações de voos e então aplique o algoritmo proposto, retornando as informações acerca *slots* que serão utilizados.
- Teste e validação do algoritmo com dados reais de tráfego aéreo brasileiro.
- Comparação dos resultados gerados com outras abordagens da literatura que tenham objetivo comum de resolução de otimização da alocação de *slots* ambientados no CTOP.

1.5 Metodologia de Pesquisa

A metodologia adotada e que será desenvolvida se fundamenta na verificação de um problema, onde será feita uma sugestão e implementação de uma solução utilizando métodos computacionais, aplicando-os em um estudo de caso, para então permitir a verificação dos resultados juntamente com comparação e análise. Logo, será feita uma coleta de dados e então será desenvolvido um protótipo computacional para ser aplicado o estudo de caso. O estudo de caso permite verificar a aplicabilidade da metodologia proposta. As etapas da metodologia serão descritas a seguir.

1.5.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica desta dissertação será feita considerando os trabalhos publicados atualmente e que estejam englobados no tema desta pesquisa. Será feita a revisão e análise de artigos científicos, manuais técnicos, dissertações, teses, livros e artigos em

sites específicos do tema. Também serão analisados e apresentados os modelos e soluções computacionais implementados com o objetivo de resolver problemas ambientados no ATM e CTOP.

1.5.2 Coleta e Levantamento de Dados

O desenvolvimento da pesquisa será ambientado em dados de voos entre determinados aeroportos para então obter os objetivos almejados. Serão capturados e utilizados os dados históricos de voos e aeroportos nos EUA para simples comparação e então serão levantados as mesmas informações ambientadas no espaço aéreo brasileiro. A captura será feita nos dados provenientes do FlightRadar24 [17], FlightAware [18], Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) [19] e informações de pesquisas relacionadas. Algumas informações também serão coletadas do Laboratório de Modelo Computacional para Transporte Aéreo de Universidade de Brasília (TransLab).

Desenvolvimento da modelagem computacional e implementação do algoritmo

Com os dados levantados, analisados e organizados, então será possível a modelagem e implementação da solução proposta para de otimização de alocação de *slots* de voos capturados no CTOP, via o TOS de cada voo, pelas companhias aéreas. Serão utilizadas técnicas de Algoritmos Genéticos, para modelar computacionalmente o ambiente do CTOP.

A proposta é a utilização da abordagem de Algoritmos Genéticos para otimizar o algoritmos geral de alocação de *slots* presente no CTOP atualmente e então obtermos um conjunto de *slots* que proporcione uma diminuição do atraso gerado com a abordagem geral. A pesquisa também irá utilizar voos ambientados no espaço aéreo brasileiro, inserindo o conceito de CTOP no Brasil, ainda não presente atualmente.

1.5.3 Aplicação, Estudo de Caso e Resultados

Após implementação da solução e algoritmo propostos para resolução do problema em questão, será desenvolvido uma estratégia e método para utilização da solução, de maneira que tenhamos as informações certas, de maneira eficiente e confiável. Com a modelagem computacional definida e implementada então esta será aplicada, para então obtermos resultados que gerarão possíveis correções do modelo em questão. Serão expostos a execução do estudo de caso, com os dados escolhidos e os resultados gerados para validar a sugestão proposta. E por fim serão mostrados os resultados, expondo a saída do modelo proposto e análise dos dados obtidos.

1.6 Organização do Trabalho

Esta dissertação, ao todo, será composta por 8 capítulos, incluindo este capítulo de introdução. Assim serão divididos da seguinte maneira, conforme a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre Algoritmos Genéticos, que é o modelo computacional que esta pesquisa se fundamenta para modelagem da solução.

No Capítulo 3 são apresentados conceitos sobre gerenciamento de tráfego aéreo com uma revisão sobre o conceito de ATM no espaço aéreo norte-americano e brasileiro e suas aplicações. Nesse capítulo também é feita uma revisão sobre o CTOP, um programa de gerenciamento utilizado pela FAA.

Essa revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2 e Capítulo 3 expõe o referencial teórico utilizado para desenvolvimento desta pesquisa.

No Capítulo 4 é realizada uma revisão e análise do estado da arte no que concerne à pesquisa do problema de sugestão de trajetórias para o CTOP, apresentando as metodologias utilizadas e os resultados obtidos pelos autores. Foram identificadas pesquisas que tratam problemas semelhantes utilizando algoritmos de busca *greedy*, Teoria dos Jogos e Algoritmos Genéticos.

No Capítulo 5 é apresentada uma discussão acerca de uma possível utilização do CTOP no espaço aéreo brasileiro e uma discussão acerca da proposta de implementação do algoritmo utilizado nesta dissertação de mestrado. Também será apresentado o modelo computacional utilizado para resolver o problema de sugestão de trajetórias para o CTOP apresentado.

No Capítulo 6 é apresentada toda a arquitetura utilizada para implementação e desenvolvimento do modelo proposto, detalhando também as ferramentas computacionais utilizadas nesta etapa.

No Capítulo 7 será apresentado o estudo de caso onde será ambientado o algoritmo proposto, com todos os cenários de testes e resultados. Após a apresentação dos resultados é feita uma análise dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 8 traz a conclusão do trabalho apresentando juntamente com os resultados obtidos de acordo com os objetivos propostos. Também serão apresentadas as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Algoritmos Genéticos

Proposto por Holland na década de 70 [20], Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos de busca que utilizam mecanismos inspirados na teoria evolutiva e genética dos seres vivos. De acordo com [21], os AGs são uma alternativa para busca de boas soluções em um espaço de busca grande e complexo, ou seja, são muito eficientes para busca de soluções ótimas, em uma variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais.

Esta seção irá apresentar uma revisão preliminar sobre AGs utilizado para desenvolver a pesquisa. O histórico dos AGs será apresentado na subseção 2.1. Na subseção 2.2 as definições e conceitos acerca de AGs serão apresentados. A subseção 2.3 descreverá a estrutura do Algoritmo Genético (AG). Algumas aplicações de AG serão exemplificadas na subseção 2.4.

2.1 História

Após apresentar a teoria evolutiva e de seleção natural das espécies, publicada em 1859 no livro *A Origem das Espécies*, Charles Darwin (1809-1882) observou que os indivíduos de determinadas espécies quando possuem características que apresentem vantagens evolutivas em comparação a outros indivíduos têm uma probabilidade maior de reprodução, possibilitando também que a próxima geração também tenha essa característica.

Essa característica que apresenta vantagem evolutiva é preservada e, em contrapartida, as características que não têm vantagem irão se extinguir. Isso possibilita que ao longo das gerações a espécie se torne mais adaptada e evoluída, pois os indivíduos mais aptos serão mantidos.

Entre os anos 50 e 60, foram desenvolvidos variados estudos sobre sistemas evolucionários como ferramentas de otimização para resolução de alguns problemas de engenharia. Sendo a ideia principal desses sistemas a evolução de possíveis soluções utilizando opera-

dores inspirados na seleção natural e teoria evolutiva. Durante esse tempo, conforme os autores fizeram em [22], vários biólogos evolucionários também desenvolveram pesquisas com o intuito de simular computacionalmente a evolução para a proposta de experimentos controlados.

Porém, foi John Holland, em 1975, no trabalho *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [23], quem iniciou pesquisas acerca de AGs. O trabalho publicado por Holland apresentou AG como uma abstração da evolução biológica e propôs um framework teórico para utilização a sua utilização. O AG de Holland é um método que passa "cromossomos" de uma população para uma outra população descendente utilizando uma espécie de "seleção natural", juntamente com definições de genética, tais como cruzamento, mutação e inversão.

2.2 Definições

Segundo o autor em [24], por ser inspirado na teoria evolutiva de seres vivos, um AG utiliza o conceito de *geração* e *população*, no qual em cada iteração (geração) do algoritmo a população atual é verificada e, então, com base nessa população o algoritmo gera uma nova população de possíveis soluções da busca. O AG tem como base de seu funcionamento um método de seleção determinando quais indivíduos irão se reproduzir gerando um número de descendentes para a próxima geração, com base em uma probabilidade indicada pelo índice de aptidão de cada indivíduo.

De acordo com o autor em [25], mesmo que os AGs utilizem um método heurístico e probabilístico para obter os novos elementos, ele não pode ser considerado uma simples busca aleatória, uma vez que explora inteligentemente as informações disponíveis de forma a buscar novos indivíduos ou soluções capazes de melhorar ainda mais um critério de desempenho.

De acordo com [26], as seguintes definições são utilizadas nos AGs, e estão relacionadas à termos existentes na biologia e genética.

- ***Indivíduos ou Cromossomos***: É a representação de um conjunto de caracteres relacionado à alguma informação referente às variáveis do problema;
- ***Gene***: É o elemento básico do indivíduo ou cromossomo. Há, em cada cromossomo, uma quantidade de genes, sendo que cada cromossomo é responsável por descrever determinada variável do problema;
- ***População***: É o conjunto de indivíduos ou cromossomos;
- ***Geração***: Corresponde ao número da iteração que o AG está executando;

- **Região ou Espaço de Busca:** É o conjunto que inclui as possíveis soluções do problema que será otimizado. É caracterizado pelas funções de restrição, que definem as soluções viáveis do problema que será resolvido.
- **Função Objetivo:** É a função que se pretende otimizar. Estão representadas nesta função as características do problema que o AG precisa para chegar ao objetivo. A representação da função é:

$$J = f(x^1, x^2, \dots, x_n)$$

onde x^1, x^2, \dots, x_n são as variáveis que o algoritmo procura definir para otimizar J . Cada indivíduo da população tem uma função objetivo calculada.

2.3 Estrutura e Funcionamento do AG

Para evolução da solução do problema de busca existem alguns passos no AG que deverão ser seguidos, sendo esses: inicialização, avaliação, seleção, cruzamento (*crossover*), mutação e substituição. Esta seção irá descrever a estrutura e os passos para funcionamento do AG.

2.3.1 Representação e Inicialização do Algoritmo

Para utilização do algoritmo é necessária primeiramente a representação ou codificação das variáveis do problema em forma de *strings* de cromossomos. De acordo com o autor em [26] podemos utilizar diferentes representações, tais como, binária, números inteiros ou reais.

Após a escolha da representação das variáveis do problema, é inicializado o algoritmo e então é criada a população inicial de indivíduos ou cromossomos, sendo esta gerada de forma aleatória na maioria das vezes. De acordo com o autor [26], pode-se também realizar a criação da população inicial utilizando uma seleção heurística, assim introduzindo indivíduos com maior interesse para uma solução aproximada já conhecida contendo algum tipo de informação prévia.

2.3.2 Avaliação

Após a criação da população inicial ou após a criação de outra população no algoritmo é necessária a avaliação da população, que irá indicar o valor de *fitness* ou valor de aptidão dos indivíduos utilizando uma função de aptidão.

Esta etapa de avaliação da população irá avaliar cada indivíduo da população verificando o quão próximo está da solução do problema, classificando então os melhores indivíduos para então dar continuidade no algoritmo, passando as características dos melhores indivíduos para as próximas gerações.

O conceito de *fitness* ou aptidão está relacionado na Biologia com a capacidade de sobrevivência e reprodução de organismos nos meios em que se encontram, permitindo que os organismos com uma maior aptidão contribua com seus genes para as gerações futuras [27]. As características dos organismos com melhores aptidão terão uma maior probabilidade de se perpetuar. Considerando os conceitos utilizados e a representação das variáveis do problema nos AG, busca-se manter as soluções com melhores resultados durante as gerações do algoritmo.

De acordo com o autor [26], nas aplicações de AG, a escolha da função de *fitness* é a etapa crítica do processo, já que esta função será utilizada para cada indivíduo de cada população dentro do processo evolutivo.

2.3.3 Seleção

A processo de seleção dos indivíduos no AG considera os melhores indivíduos de uma população, com base na aptidão ou *fitness* de cada indivíduo, para então receberem uma maior probabilidade de comporem a próxima geração e então se reproduzirem, permitindo assim a sobrevivência dos melhores indivíduos e mantendo as características dos mais aptos. Contudo, os indivíduos com uma menor aptidão serão descartados da população de acordo com o método de seleção utilizado no AG. Esta seção irá apresentar dois métodos de seleção presentes nos AG.

Seleção Proporcional à Aptidão

Este é o tipo de seleção original do algoritmo proposto por Holland [23], sendo esta seleção muito utilizada na maioria das implementações de AG disponíveis na literatura.

Segundo o autor em [26], podemos quantificar a probabilidade p_i do i -ésimo indivíduo ou cromossomo da população vir a ser selecionado para reprodução com base no cálculo proporcional ao seu valor da função de aptidão, $f_i = f(x_i)$. Sendo p_i dada por:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}$$

na qual, assumimos que f_i é positiva e N é o tamanho da população utilizada. Com a probabilidade uma vez quantificada então é utilizado um método para seleção dos indivíduos sendo o "método da roleta" um dos mais utilizados. No método da roleta cada

indivíduo da população é representado proporcionalmente pelo seu índice de aptidão, possibilitando que as melhores soluções tenham um maior espaço na roleta.

A Figura 2.1 apresenta um exemplo do Método da Roleta, onde a população é composta por 4 *strings* onde cada uma tem uma função f de *fitness* conforme a Tabela 2.1. Com a soma do *fitness* de cada indivíduo temos o valor de 1170 que corresponde a 100% do total do *fitness* da população. Para exemplificar, temos a *string* de N° 1 com um valor de *fitness* 169 que representa 14,4% do *fitness* ou aptidão total. Dessa forma, a probabilidade da seleção da *string* 1 é 0,144 em cada giro da roleta.

No	String	Fitness	% do Total
1	01101	169	14,4
2	11000	576	49,2
3	01000	64	5,5
4	10011	361	30,9
Total		1170	100,0

Tabela 2.1: Exemplo de *strings* e os valores de *fitness*.

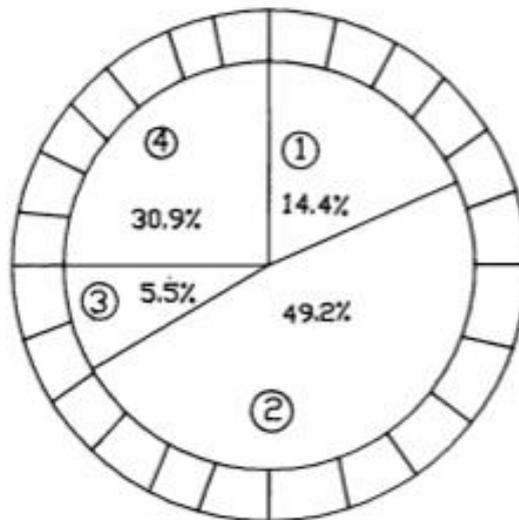


Figura 2.1: Método da Roleta. [2].

Seleção por Torneio

A ideia deste método é a execução de um torneio entre um grupo aleatório de $N(N > 2)$ indivíduos ou cromossomos, permitindo que o indivíduo com o maior de *fitness* seja selecionado e descartando o restante dos indivíduos. Repete-se este processo até que se obtenha

uma nova população, sendo que a quantidade de torneios promovidos correspondente ao tamanho da população. De acordo com [28] o algoritmo da seleção por torneio poderá ser implementado conforme o exemplo a seguir, considerando o $n = 2$:

```
início
|
| k=0,75; Avaliação dos indivíduos na população P;
| repita
| | Escolha aleatoriamente 2 indivíduos da população;
| | se  $r < k$  então
| | | Escolha o indivíduo com melhor fitness;
| | fim
| | senão
| | | Escolha o indivíduo com o pior fitness;
| | fim
| até  $n=2$ ;
fim
```

Segundo o autor em [26] há vantagens na utilização da seleção por torneio, entre as quais podemos citar:

- A seleção não gera convergência prematura;
- Não é necessário esforço computacional extra, tal como ordenamento;
- É desnecessária aptidão explícita;
- Há inspiração biológica do processo.

Seleção Elitista

Este método de seleção, proposto inicialmente pelo autor em [29] é utilizado comumente com o objetivo de aumentar a convergência do algoritmo. Normalmente é uma adição a muitos outros métodos de seleção, forçando o AG a manter alguns dos melhores indivíduos em cada geração.

O processo de elitismo copia os $N(N \geq 1)$ indivíduos com melhor *fitness* da população atual para a próxima geração, permitindo que estes indivíduos não sejam excluídos nas próximas operações de cruzamento e mutação. Ao manter os melhores indivíduos durante o processo evolutivo gera uma sequência monotônica, mantendo um melhor resultado.

Segundo o autor em [2], esses indivíduos que são mantidos, podem se perder no decorrer do AG se eles não forem selecionados para reprodução ou se forem destruídos por operadores genéticos, tais como cruzamento ou mutação.

Muitos pesquisadores acreditam que o elitismo pode melhorar significativamente o desempenho do AG. Segundo o autor em [26], a desvantagem da seleção elitista é a possibilidade de forçar a busca, pela presença de mais uma cópia do melhor indivíduo, na direção de algum ponto ótimo local que tenha sido descoberto antes do global.

2.3.4 Operadores Genéticos

Os operadores genéticos são definidos como funções que podem ser aplicadas em uma população do AG, permitindo a criação de novas populações. Com o objetivo de conseguir um resultado satisfatório, estes operadores transformam a população durante as gerações. Consideramos os operadores genéticos importantes na implementação e execução do algoritmo, pois mantém a diversidade dos indivíduos e populações durante as gerações e também as características de adaptação conquistadas por uma geração para as próximas. Normalmente utilizamos dois operadores genéticos básicos nos AG: cruzamento (*crossover*) e mutação. Estes operadores serão apresentados nas subseções a seguir.

Cruzamento (*Crossover*)

Este operador genético gera novas soluções através da recombinação ou cruzamento das informações genéticas dos indivíduos, ou seja, através das informações dos genitores são gerados novos indivíduos (filhos) para as próximas gerações. A troca de informações entre os indivíduos tenta reproduzir, em um maior nível de abstração, a reprodução de genes em células.

No cruzamento dos indivíduos, os genes de um genitor são substituídos pelos genes de um outro correspondente, esperando assim, durante as gerações, que os indivíduos de uma geração sejam melhores que os indivíduos da geração anterior.

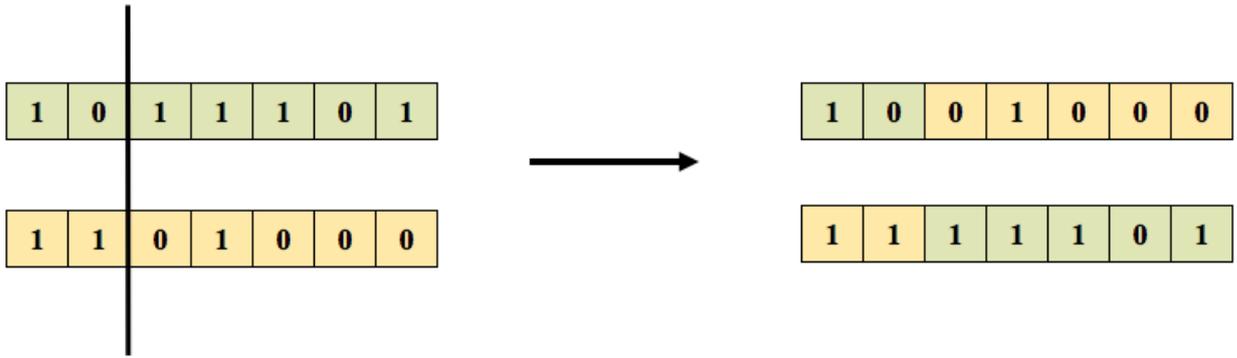
Existem várias maneiras de utilizar o cruzamento, dentre essas estão três abordagens apresentadas a seguir:

- **Cruzamento em um ponto**

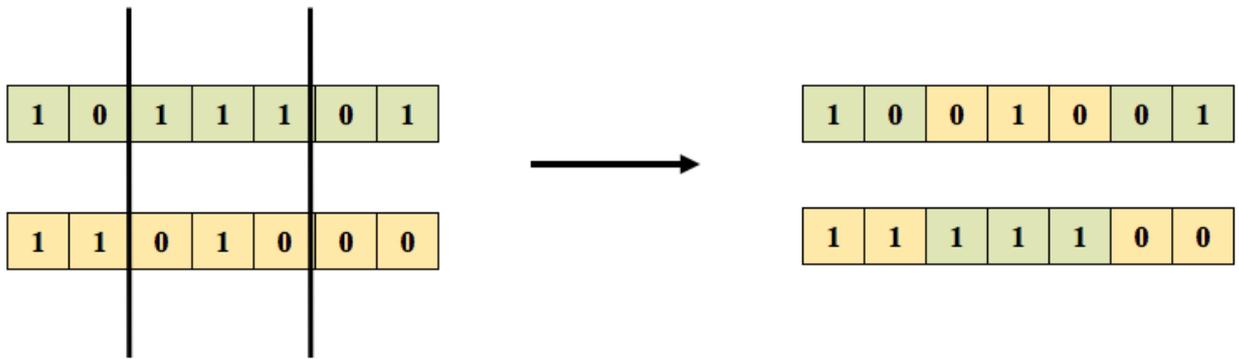
Neste tipo de *crossover* um ponto de cruzamento é escolhido no par de indivíduos que farão a recombinação e, então, a partir deste ponto as informações genéticas ou os alelos dos pais são trocados. A Figura 2.2(a) apresenta dois cromossomos realizando o cruzamento no ponto escolhido. Após esse procedimento, os novos cromossomos (filhos), substituirão os genitores(pais) na próxima população.

- **Cruzamento multiponto**

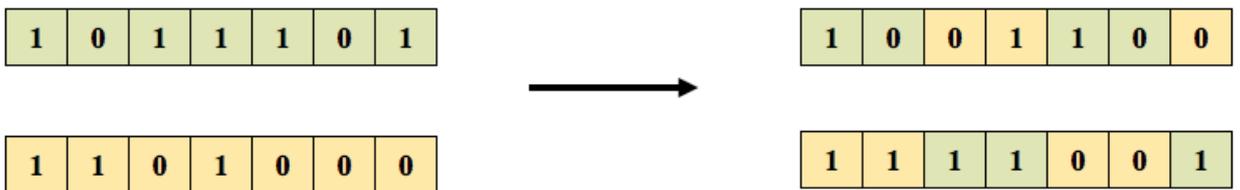
Este tipo de cruzamento é uma generalização do cruzamento em um ponto. Nesta abordagem, vários pontos podem ser escolhidos aleatoriamente e, em seguida, é



(a) Cruzamento em um ponto.



(b) Cruzamento multiponto.



(c) Cruzamento uniforme.

Figura 2.2: Tipos de Cruzamento.

realizada a troca de informações genéticas entre os genitores (pais) gerando os indivíduos descendentes (filhos) para a geração sucessora. Um exemplo da seleção

multiponto é apresentada na Figura 2.2(b) onde os cruzamentos ocorrem em vários pontos definidos.

- **Cruzamento uniforme**

No cruzamento uniforme não são utilizados pontos de cruzamento dos cromossomos. Há uma probabilidade p_i de cada informação genética ou característica ser herdada de cada pai, denominada probabilidade de troca. A Figura 2.2(c) apresenta um exemplo de cruzamento uniforme em dois indivíduos.

Mutação

Este operador genético altera aleatoriamente alguma característica ou informação genética do indivíduo, sendo necessária a mutação para introdução e manutenção da diversidade genética em uma determinada população.

A importância da mutação no algoritmo está ligada na criação de novas características que até então não existiam na população corrente do algoritmo. A mutação de um gene em um AG é uma alteração randômica de uma posição da *string* e em *strings* binárias é simplesmente a troca de 0 por 1 e vice-versa [2].

O operador genético de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação p_m . A taxa de mutação define a probabilidade em que haverá a mutação de cromossomos nas populações durante a evolução. Por ser um operador genético secundário, utiliza-se normalmente uma taxa de mutação pequena, conforme a genética natural.

De acordo com o autor [26], a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca não seja nula. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos por meio de uma taxa de mutação geralmente pequena.

A Figura 2.3 apresenta um exemplo de mutação de um indivíduo. À esquerda da figura é apresentado o indivíduo original (antes da mutação), enquanto que à direita é apresentado o indivíduo após a mutação.



Figura 2.3: Indivíduo antes e após a aplicação do operador de mutação.

2.3.5 Substituição

Com a criação de uma nova população utilizando operadores genéticos, tais como cruzamento (*crossover*) e mutação, é possível substituir a antiga população pela nova gerada. Há algumas técnicas para substituição da população no AG, a seguir estas serão exemplificadas:

Substituição Geracional

Esta técnica exclui todos os membros da população atual, substituindo-os pela nova população de indivíduos gerados na iteração atual do algoritmo. Podemos definir esta substituição de duas formas:

- Os N pais são substituídos pelos N filhos em cada geração.
- Os N pais são substituídos por N indivíduos do conjunto união de pais e filhos.

Normalmente, pela simplicidade de implementação, esta técnica é a mais utilizada nos AG.

Substituição Geracional com Elitismo

É similar à substituição geracional, porém é aplicado o conceito de elitismo, mantendo os k indivíduos mais aptos em cada iteração e substituição da população. Definimos essa seleção da seguinte forma:

- Os $k < N$ melhores pais nunca são substituídos. Usualmente $k = 1$.

Se aumentarmos o valor de k há o risco de convergência prematura da solução.

Substituição de Estado Uniforme (*state ready*)

É similar às outras substituições, porém neste caso algumas restrições são feitas, tal como evitar a inserção de um filho na população quando há uma duplicata dele na população. Neste caso, em cada geração, normalmente 2 ou 1 filhos são gerados e, então, podem substituir:

- Os 2 indivíduos mais velhos, sendo os mais velhos os indivíduos que estão a mais tempo na população;
- Os 2 piores indivíduos da população;
- Os genitores.

Alternativamente, $k < N$ filhos são gerados e substituem os k piores indivíduos da população.

2.3.6 Funcionamento do Algoritmo Genético

A implementação e execução do AG deverão seguir alguns passos:

1. Primeiramente, devemos escolher uma representação adequada para os indivíduos ou cromossomos da população. Podemos utilizar codificação binária para a representação, permitindo um cruzamento e mutação mais simples dos indivíduos. Após essa definição, escolhe-se uma população inicial, que é normalmente composta por indivíduos criados de forma aleatória.
2. Após a criação da população inicial é feita uma avaliação de toda a população com base em alguma regra que define a qualidade de cada indivíduo. Chamamos essa avaliação de função de aptidão ou função de *fitness*. Os indivíduos que tiverem uma melhor aptidão são definidos os melhores indivíduos.
3. É feita uma classificação dos melhores indivíduos para então compor uma nova população. Após, é então definido um método que possibilite a utilização dos operadores genéticos de cruzamento e mutação nos indivíduos selecionados, assim obtendo uma nova população.
4. Os passos descritos anteriormente são repetidos até que certas condições sejam satisfeitas, sendo essas:
 - (a) até que um indivíduo com uma qualidade aceitável seja encontrado;
 - (b) até que uma quantidade de passos ou gerações máxima seja atingida;
 - (c) até que o algoritmo não demonstre mais evolução.

A Figura 2.4 apresenta um fluxograma da estrutura básica de um AG. O AG descrito anteriormente é apresentado também no algoritmo a seguir, onde o definimos como Algoritmo Genético "*Genérico*".

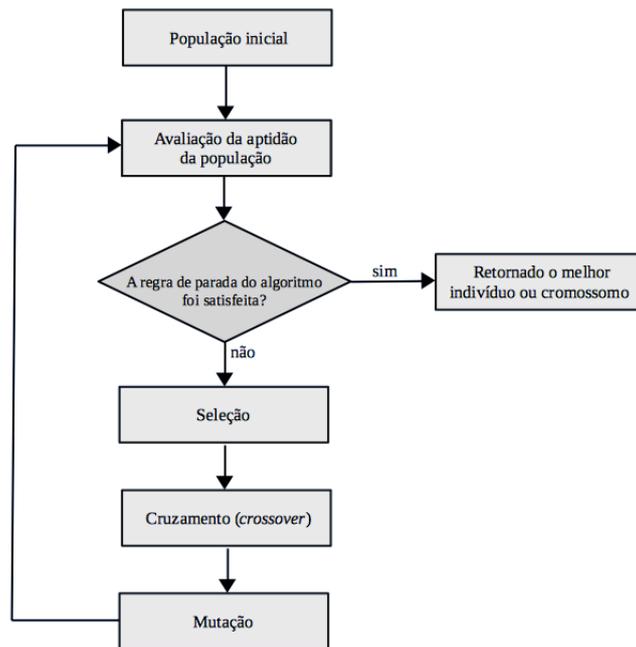


Figura 2.4: Passos do AG genérico.

Algoritmo Genético "*Genérico*"

início

inicialização da população P de indivíduos;

Avaliação dos indivíduos na população P;

repita

 Selecione indivíduos de P para reprodução;

 Aplique operadores de cruzamento e/ou mutação;

 Avalie indivíduos gerados na população;

até objetivo final ou máximo de gerações;

fim

Na literatura também existem outras estruturas de AG, com alterações dos procedimentos e utilizações de outros operadores genéticos, tais como, Algoritmo Genético *Geracional* e Algoritmo Genético *em regime*, que são descritos a seguir:

Algoritmo Genético "*Geracional*"

Neste caso, utilizando a Substituição Geracional e aplicação dos operadores genéticos, toda a população é excluída e substituída por novos indivíduos. Um fator importante neste algoritmo é que toda a geração de genitores é substituída por uma geração de filhos, excluindo uma convivência entre ambas as gerações, proporcionando a perda de indivíduos potencialmente bons. O algoritmo a seguir descreve este caso:

início

Inicialização da população P de indivíduos;

Avaliação dos indivíduos na população P;

repita

repita

Selecione 2 indivíduos de P para reprodução;

Aplique operador genético de cruzamento com probabilidade p_c ;

Aplique operador genético de mutação com probabilidade p_m ;

Insira o novo indivíduo em P';

até completar a população P';

Avalie indivíduos gerados na população P';

$P \leftarrow P'$

até objetivo final ou máximo de gerações;

fim

Algoritmo Genético "*em Regime*"

Neste caso, utilizando a Substituição de Estado Uniforme no AG, apenas 1 indivíduo é criado. Em seguida é realizada a avaliação deste indivíduo, substituindo pelo, pelo pior indivíduo da população. No caso do indivíduo recém-criado ter uma aptidão pior que todos os indivíduos da população, não há substituição e a população não é alterada. Em seguida, prossegue-se com a criação de um novo indivíduo. O algoritmo a seguir

exemplifica este caso:

início

Inicialização da população P de indivíduos;

Avaliação dos indivíduos na população P ;

repita

 Selecione indivíduo(s) de P para reprodução;

 Aplique operador genético de cruzamento ou mutação;

 Avalie indivíduo(s) gerados;

 Selecione um indivíduo I para sobreviver;

se I é melhor que o pior elemento de P **então**

 Substitua I na posição do pior elemento de P ;

fim

até objetivo final ou limite máximo de gerações;

fim

2.4 Aplicações dos Algoritmos Genéticos

Embora os Algoritmos Genéticos surgiram com a função principal de buscar boas soluções em um espaço de busca grande e complexo, atualmente há na literatura algumas aplicações do algoritmo com o intuito de resolução de variados tipos de problemas. Nesta seção descreveremos algumas das aplicações e técnicas de utilização de AG que podem ser utilizadas para a resolução de problemas específicos e que possam permitir um melhor funcionamento e abrangência do algoritmo. Serão apresentadas algumas aplicações utilizando AG para resolução de problemas atuais na área de transporte.

2.4.1 Otimização em AG com Elitismo na Definição de Rotas de Transporte Público.

Segundo os autores em [30], há um problema na definição de rotas eficientes em um sistema de transporte público rodoviário, principalmente na escolha de pontos de partida e horários de determinadas linhas de ônibus. Para elaboração de uma definição eficiente de uma rede de rotas e resolução do problema, os autores utilizaram Algoritmo Genético. A solução do concentra na diminuição do tempo de viagem e do número de transferências entre passageiros nas linhas de transporte.

A rede rodoviária foi descrita por um grafo $G = (N, A)$, onde N é o conjunto de nós, os quais representam os pontos de ônibus, e A é o conjunto de arestas, onde cada aresta representa as ruas da cidade.

O principal indicador que os autores utilizaram para descrever o nível de serviço de trânsito é o tempo total de viagem gasto pelos usuários no trânsito, dado por T . Dessa maneira, a qualidade da solução gerada foi dada em minutos. Logo o objetivo do Algoritmo Genético é encontrar um conjunto de rotas tais que T seja minimizado.

Na pesquisa foi utilizado um AG com o princípio do elitismo para resolução do problema. Os autores também aumentaram o tamanho da população a cada geração (iteração) do algoritmo.

Conforme apresentado na Figura 2.5, é feita a mutação de determinado cromossomo escolhendo um dos terminais (terminal i) da rota selecionada aleatoriamente, e após, é escolhido um novo terminal k usando a seleção de roleta. A nova rota será o caminho mais curto entre o terminal i e o terminal k .

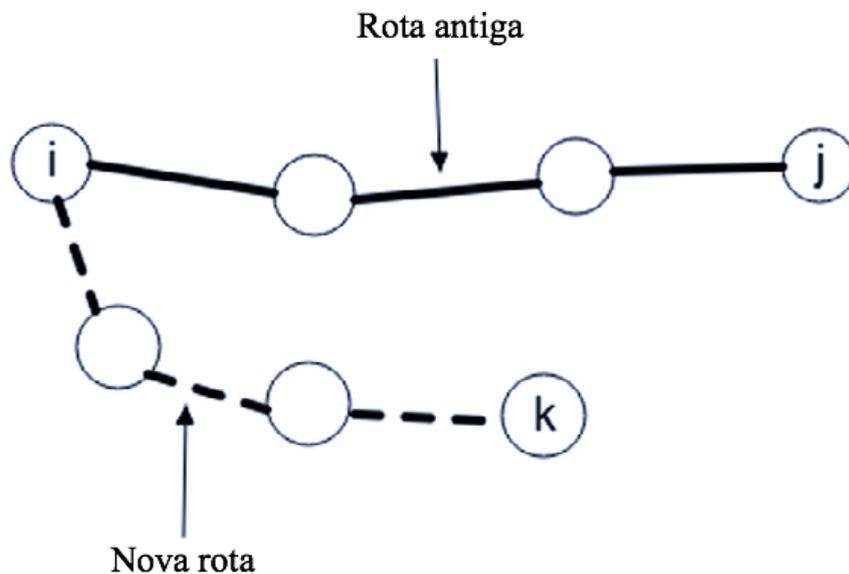


Figura 2.5: Modificação de uma rota após mutação no AG..

Segundo os autores, algumas abordagens heurísticas têm sido amplamente utilizadas na literatura para resolução do problema de definição de redes de transporte. O AG apresentado se mostrou competitivo com outras abordagens utilizadas até então, gerando soluções de alta qualidade e com resultados superiores para resolução de tal problema.

2.4.2 Otimização do Projeto de Aeronaves com AG

De acordo com o autor em [31], a minimização do peso máximo de decolagem da aeronave está se tornando um aspecto crítico do transporte aéreo e indústria, reflexo do aumento dos preços do petróleo, aumento do tráfego aéreo e questões ambientais.

Foi proposto um método simplificado utilizando AG para otimização do peso máximo de decolagem das aeronaves de transporte, buscando um projeto ótimo para a aeronave. Uma aplicação com AG foi desenvolvida com o objetivo de reduzir o número de decisões e o tempo e custo do projeto conceitual das aeronaves.

No desenvolvimento da aplicação com AG, foram consideradas algumas informações para dimensionamento das variáveis do problema, tais como, distância de decolagem, distância de pouso, velocidade de cruzeiro, carga útil entre outros. Também foi utilizada a estratégia de AG com elitismo na iteração do algoritmo.

Conforme apresentado na Figura 2.6, o AG buscou durante as gerações um melhor valor para a envergadura da asa para o projeto preliminar da aeronave. O valor obtido busca uma minimização do peso ótimo de decolagem.

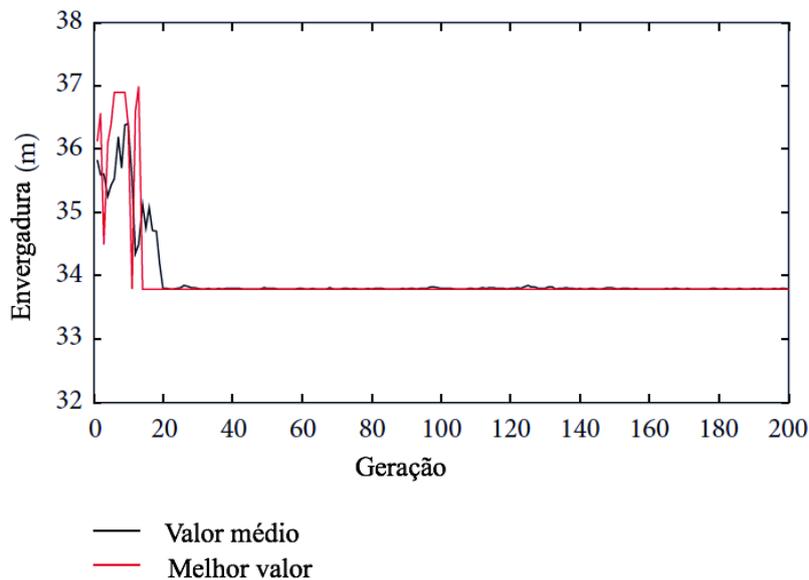


Figura 2.6: Otimização do tamanho da envergadura da asa da aeronave durante as gerações do algoritmo..

Especificamente, o estudo analisado confirma que o uso do algoritmo de otimização evolutiva é útil para avaliar as possíveis melhorias nas aeronaves, tal como, o consumo de combustível, bem como o projeto preliminar. Além disso, os autores verificaram que o trabalho pode ser implementado para qualquer tipo de aeronave seguindo a lógica de AG, gerando assim uma abordagem de solução de propósito geral.

Capítulo 3

Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM)

3.1 *Air Traffic Management*(ATM)

Segundo os autores em e [32], o Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM) foca em disponibilizar maneiras de gerenciar o tráfego aéreo considerando fatores como segurança, planejamento, finanças e meteorologia. De acordo com [4], a importância do gerenciamento do espaço aéreo está ligada à monitoração, controle e fluxos das aeronaves por aerovias definidas, integrando o gerenciamento, obtendo maior efetividade nas ações tomadas. O ATM pode ser dividido em três setores:

- *Air Space Management* - ASM : O gerenciamento do espaço aéreo tem como objetivo aumentar o tráfego e capacidade de aeronaves no espaço aéreo, focando em atender a demanda necessária dentro do escopo disponível. Utilizando as aerovias, áreas terminais entre outras estruturas de controle, o objetivo do ASM é providenciar uma estrutura que aumente a eficiência das operações aeronáuticas, atendendo a demanda de tráfego aéreo.
- *Air Traffic Control* - ATC : O controle de tráfego aéreo tem como objetivo o controle de voos das aeronaves, focando em disponibilizar informações necessárias para manter a segurança dos voos, posicionando as aeronaves de forma que evite colisões. Em outras palavras, o ATC organiza e permite um melhor fluxo de tráfego, apoiando e fornecendo informações aos pilotos.

A execução do ATC é feita por órgãos de controle, onde os controladores de voos disponibilizam as coordenadas para as aeronaves, controlam o deslocamento interno dos aeroportos e das áreas de manobras, entre outras. O ATC tem grande importância para a harmonia do espaço aéreo.

- *Air Traffic Flow Management - ATFM* : O gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo tem como objetivo fornecer informações para que a segurança do fluxo de aeronaves seja mantida, evitando e diminuindo impactos derivados de medidas não previstas. Atualmente são realizados estudos que visam indicar possíveis erros ou sobrecargas em diversas áreas do ATFM, como tecnologia, infraestrutura, dentre outros. Identificado esses imprevistos é possível agir na medida e maneira correta, possibilitando um melhor gerenciamento de tráfego e conseqüentemente evitando possíveis acidentes.

Esta pesquisa foca no ambiente ATFM, onde de acordo com [33], o ATFM provê informação para monitorar o fluxo de tráfego aéreo com segurança, reduz possíveis impactos em cenários futuros e gerencia a rota da aeronave com segurança, rapidez e economia.

3.1.1 Espaço Aéreo Brasileiro

No ano de 1990, foi instituído o Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SIS-CEAB), sendo este gerenciado pelo Comando da Aeronáutica, através do órgão central do sistema, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) [34].

O DECEA faz o gerenciamento do espaço aéreo brasileiro através de seus órgãos regionais, onde podemos destacar os Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle do Espaço Aéreo (CINDACTA), que tem com o objetivo tornar mais seguro e confiável o fluxo aéreo da aérea sob sua jurisdição.

Outro objetivo do CINDACTA é a execução da atividade de ATC, auxiliando o Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea (CGNA) no ATFM . O órgão responsável pelas atividades referentes à ATFM no espaço aéreo brasileiro é o CGNA.

Conforme ilustrado na Figura 3.1, o espaço aéreo brasileiro engloba todo o território nacional, juntamente com uma parte do Oceano Atlântico. Pode-se verificar no mapa o espaço aéreo brasileiro é dividido em cinco Regiões de Informação de Voos (*Flight Information Regions - FIR*), sendo estas:

1. FIR - Amazônica
2. FIR - Recife
3. FIR - Brasília
4. FIR - Curitiba
5. FIR - Atlântico

Cada FIR é subdividida em setores de controle, onde cada setor de controle fica sob responsabilidade de dois controladores e um supervisor, estes lotados nos Centros de Controle

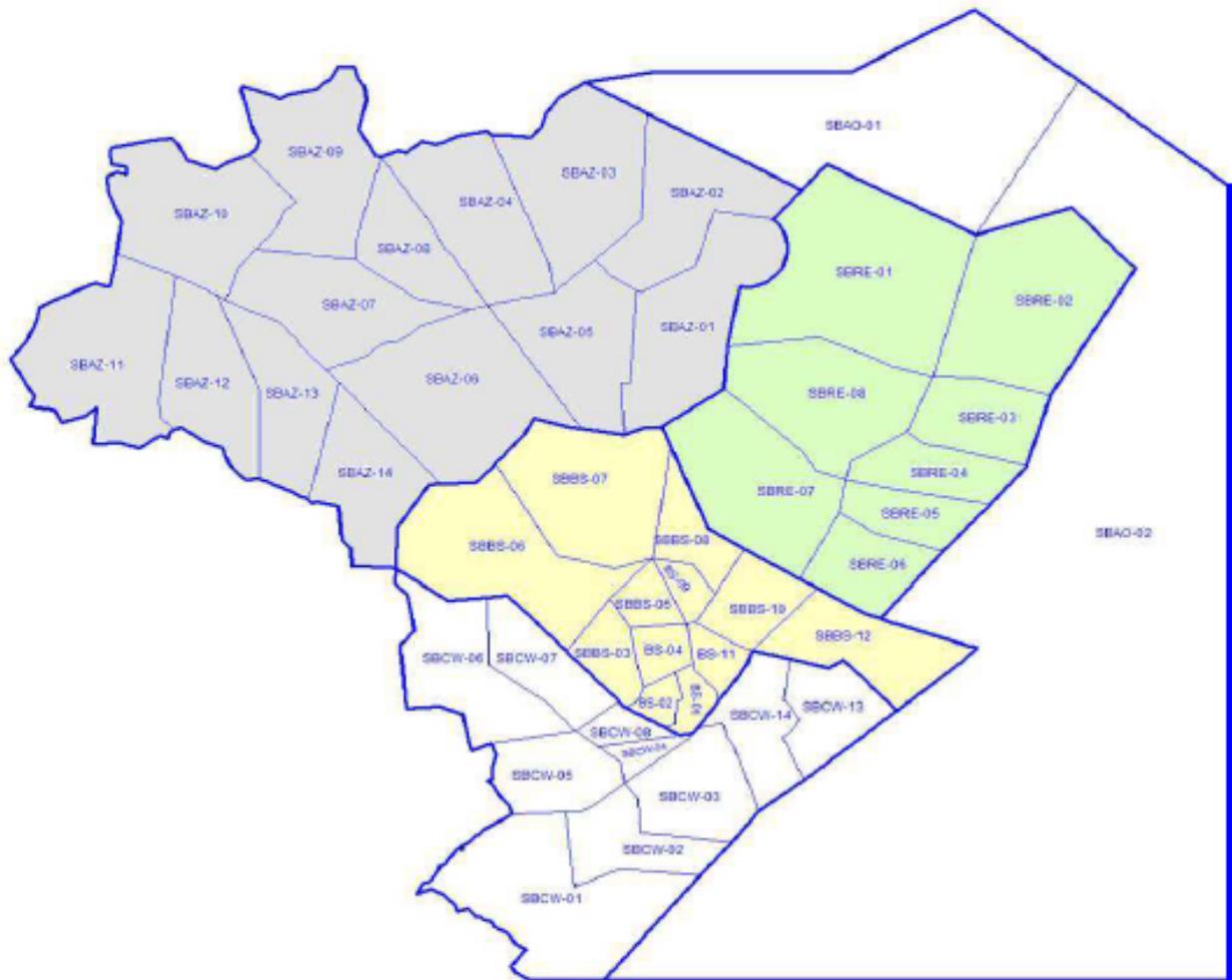


Figura 3.1: Espaço aéreo brasileiro. [3]

de Área (*Area Control Center - ACC*). Cada CINDACTA possui um ACC responsável pela FIR correspondente. Sendo assim, o espaço aéreo no Brasil está dividido em 46 setores de controle, onde existem 14 na FIR - Amazônica, 8 na FIR - Recife, 12 na FIR - Brasília, 10 na FIR - Curitiba e 2 na FIR - Atlântico.

3.1.2 ATFM no Espaço Aéreo Brasileiro

Serviço ATM e definições

O Serviço ATFM deverá ser prestado e executado para o espaço aéreo onde a demanda de tráfego, às vezes, excede a capacidade ATC declarada [35].

Normalmente o serviço de ATFM é efetuado e dividido em três fases, sendo essas:

- **Planejamento estratégico** - São as ações efetuadas com antecedência de mais de um dia com respeito àquele dia em que entrariam em vigor. Estas ações deverão ser efetuadas juntamente com o ATC e os operadores de aeronave.
- **Planejamento pré-tático** - São as ações efetuadas no dia anterior àquele dia em que entrariam em vigor. O gerenciamento pré-tático tem como objetivo a atualização do planejamento feito na fase anterior, incrementando com informações mais precisas sobre a evolução da capacidade e das demandas de voo, considerando dados meteorológicos, infraestrutura, eventos especiais e etc.
- **Operações táticas** - São as ações efetuadas no dia em que entrariam em vigor. Essas ações tem como objetivo a execução tática e acompanhamento da ocorrência de fatores inesperados que possam afetar a capacidade e/ou a demanda dos serviços de tráfego aéreo, empregando e acompanhando as medidas mitigadoras de impactos no fluxo.

De acordo com o DECEA [36], um *slot* ATC é o horário definido para que uma aeronave efetue a passagem sobre um fixo de Posição ou uma operação de pouso ou decolagem. Um fixo de posição é um ponto de interseção de duas ou mais linhas de posição em uma carta ou mapa servindo para determinar a posição de determinada aeronave [37].

O período de validade de um SLOT ATC deverá estar compreendido entre 30 minutos antes e até 30 minutos após o horário alocado, exceto quando as operações de pouso ou decolagem sejam atrasadas por alguns motivos, tais como:

- condições meteorológicas adversas;
- interrupção na prestação do ATS;
- interdição ou impraticabilidade da infraestrutura aeroportuária;
- e aplicação de medidas de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo.

Dessa forma, todas as atividades nos aeroportos executadas por companhias aéreas, tais como pousos e decolagens, pertinentes ao ATFM, estão limitadas à obtenção de *slots* por estas.

Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA)

As atividades relacionadas ao Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) no Brasil foram iniciadas no ano de 1996 com a necessidade de coordenação do Aeroporto de Congonhas, onde a necessidade e demanda do tráfego aéreo ultrapassa a capacidade do

aeroporto, sendo então necessário o gerenciamento e coordenação dos voos ambientados em obtenção de *slots* ATC. [3].

O órgão responsável pela prestação de serviços de ATM no Brasil é o Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA). Essa prestação é executada de forma centralizada, com apoio das Células de Gerenciamento de Fluxo estabelecidas em todos os Centro de Controle de Área (*Area Control Center*) (ACC) e nos Controle de Aproximação (*Approach Center*) (APP) com uma demanda de tráfego aéreo significativa [35].

Criado em 2005 e ativado em 2007, o Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) é uma das mais recentes unidades do DECEA, tendo como fator determinante o crescimento da atividade aeronáutica nos aeroportos do espaço aéreo brasileiro. O início das operações do CGNA possibilitou a execução de atividades de ATFM no espaço aéreo brasileiro, facilitando o trabalho de pilotos e controladores de voos [38].

Nas atribuições do ATFM, o CGNA possui ascendência operacional sobre todos os órgãos prestadores de serviço do SISCEAB em um momento que não haver acordo entre o CGNA os órgãos envolvidos.

Dentre as competências do CGNA, podemos destacar algumas, tais como [35]:

1. Monitorar as atividades operacionais de competência e atribuição do DECEA;
2. Avaliar o impacto das inoperâncias e/ou limitações operacionais na capacidade ATC e, em coordenação com Órgão da Administração Pública Federal, na capacidade aeroportuária;
3. Aplicar medidas ATFM para manter o balanceamento entre a demanda dos movimentos aéreos e as capacidades declaradas;
4. Aferir as medidas ATFM;
5. Executar as medidas e ações necessárias quanto à utilização flexível do espaço aéreo;
6. Arbitrar as medidas que identificar mais adequadas para, de forma preventiva, evitar a ocorrência de saturação e congestionamento de setores de controle do espaço aéreo, quando não haver acordo entre os órgãos ATC, operadores e CGNA.
7. Conduzir o processo de tomada de decisões colaborativas junto aos provedores e operadores;
8. Monitorar a segurança do espaço aéreo, em conformidade com os padrões estabelecidos nos documentos da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI);
9. Coordenar as atividades de gerenciamento do espaço aéreo brasileiro;
10. Definir a sequência de pousos ou decolagens de um aeródromo;

11. Definir a prioridade da sequência de pousos e decolagens para voos internacionais ou de longa duração para um aeródromo;
12. Definir se ocorrerá ou não a realização de eventos dentro de uma faixa de horário que esteja previsto;
13. Alocar *slots* aos voos nos aeródromos de origem com destino a um aeródromo coordenado.

Desta maneira, o CGNA deve ser núcleo de todas as atividades e regulamentações diárias pertinentes ao ATFM no espaço aéreo brasileiro, contando principalmente com um relacionamento entre os variados órgãos de controle e gerenciamento, incrementando de forma significativa os serviços de ATFM.

3.2 Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo

De acordo com o autor em [4], o gerenciamento de tráfego aéreo está em constante aprimoramento dos procedimentos para melhorar os níveis de segurança, a fluência de tráfego, a qualidade dos serviços prestados aos clientes finais, dentre outros. E isso desperta o interesse de todos os envolvidos no gerenciamento de tráfego aéreo, na busca de viabilizar procedimentos que possam melhorar os negócios de companhias aéreas, por exemplo.

Diante disso, em 2012, o órgão responsável pelo controle de tráfego aéreo nos EUA, a *Federal Aviation Administration* (FAA), apresentou um plano para a implementação da iniciativa *Next Generation Air Transportation System* (NextGen), visando a melhoria de gerenciamento e atividades derivadas do *National Airspace System*(NAS). O objetivo do NextGen é a integração das tecnologias, políticas e procedimentos existentes com as novas abordagens, possibilitando uma melhora na segurança e na experiência do passageiros [14].

Incluso nessa iniciativa, o *Collaborative Trajectory Options Program* (CTOP), foi lançado em 2012 pela FAA, sendo um programa que consiste numa evolução de programas como o de espera em solo (GDP) e espera no ar (AFP), tendo como objetivo o melhor gerenciamento de tráfego aéreo abrangendo o usuários do NAS e seus objetivos de negócio, as particularidades de cada voo e as restrições do espaço aéreo. Esse novo programa possibilita mais flexibilidade para todo o processo e mais estabilidade para o negócio dos envolvidos, utilizando as preferências de rotas de cada companhia aérea para cada voo envolvido no CTOP.

A iniciativa ficou em testes até 2014, após esse ano foi colocada em uso no espaço aéreo dos EUA pela FAA. [39], [10], [40].

Um dos objetivos do CTOP é a possibilidade que a interferência do órgão de controle de tráfego aéreo gere uma menor insatisfação dos usuários do NAS, ou seja, as companhias

3.2.1 Conjunto de Opções de Trajetória (TOS)

O conjunto de opções de trajetória (*Trajectory Options Set - TOS*) apresenta as possibilidades ou opções de rotas para cada voo, baseadas em uma ordem de preferência que a companhia aérea irá utilizar em determinado voo. Existe uma variação de rotas possíveis para determina trajetória entre dois aeroportos, onde determinada companhia aérea informa à FAA a sua preferência para cada voo.

Seguindo as restrições de capacidade para determinadas Área Restrita de Fluxo (*Flow Constrained Area*) (FCA), a FAA irá verificar o TOS de cada voo, enviado pela companhia aérea, e determinar a ordem final. Só há a utilização de TOS quando existe um CTOP iniciado e para os voos que foram escolhidos para receberem restrições do programa. Conforme ilustrado na Figura 3.3, é apresentado um exemplo de uma demanda CTOP que foi iniciada com duas FCAs, FCA001 e FCA002, e com três possíveis rotas para os voos com origem no aeroporto *Dallas/Fort Worth International Airport (DFW)* e com destino nos aeroportos *Newark Liberty International Airport (EWR)*, *Airport LaGuardia (LGA)* e *John F. Kennedy International Airport (JFK)*.

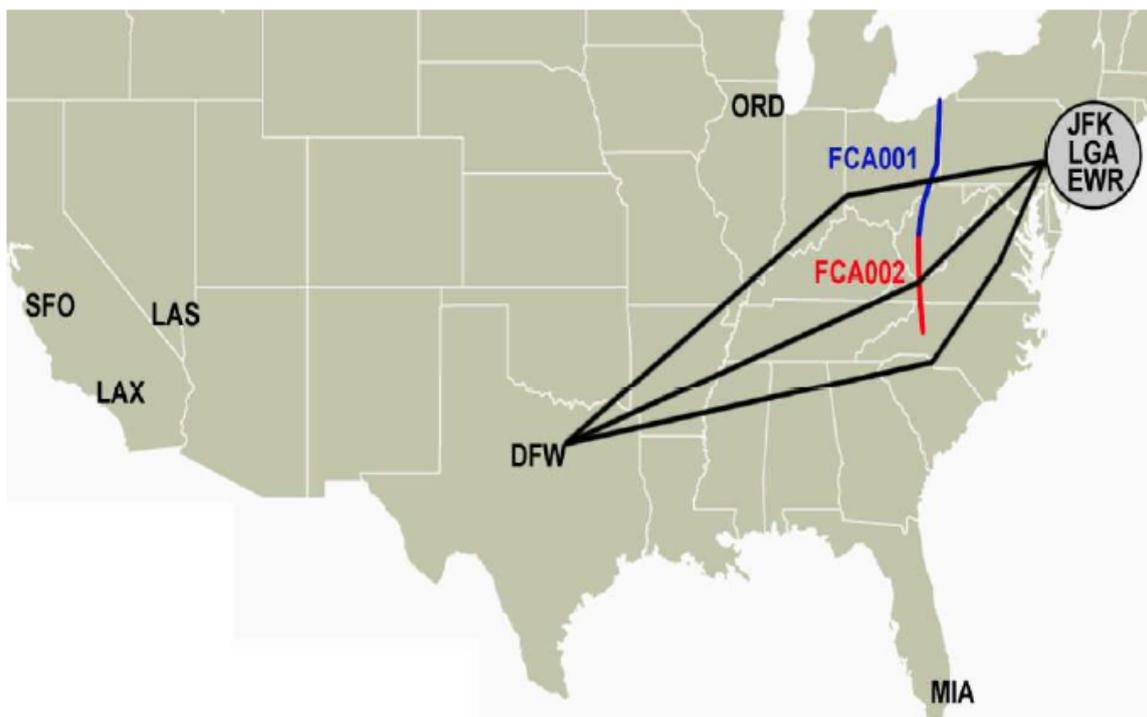


Figura 3.3: Exemplo do CTOP. [4]

Segundo o autor em [4], a ordem final de associação é dada pelo horário mínimo de cada rota enviada à uma das FCA's, sendo conhecida como fila *Initial Arrival Time (IAT)*. Exemplificando, suponhamos que existem 3 voos no CTOP e duas FCA's. Além disso, supõe-se que cada companhia aérea enviou para FAA duas trajetórias para cada voo. O

Route	Altitude	Speed	Relative Trajectory Cost (RTC)	Trajectory Valid Start Time (TVST)	Trajectory Valid End Time (TVET)	Required Minimum Notification Time (RMNT)
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	350	480	0	13:00	-	-
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	370	480	10	13:00	15:00	-
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	350	480	20	13:00	16:00	45
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	370	480	25	13:00	15:50	45
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	350	480	40	13:00	16:00	-
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	370	480	45	13:00	15:00	-

Figura 3.4: Exemplo de TOS. [5]

Earliest Arrival Time (EAT) corresponde ao horário mínimo que a aeronave consegue entrar no FCA, considerando todas as rotas enviadas.

Logo, a ordem de IAT será utilizada para verificar qual o *slot* está disponível com o menor custo analisando os horários EAT's de cada FCA para associar os voos. De acordo com o autor em [41], o algoritmo geral de associação e alocação de *slots* do CTOP pode ser descrito em seis passos:

- *Determinar quais voos estão na demanda CTOP;*
- *Determinar quais voos são exceções na demanda;*
- *Associar às trajetórias os voos de exceção;*
- *Ordenar os voos restantes de acordo com o IAT de cada voo;*
- *De acordo com a ordem IAT e a capacidade disponível, é associado à rota preferencial que esteja disponível para cada voo;*
- *Enviar a associação final para cada usuário do NAS ou companhia aérea.*

Por fim, alguns voos serão classificados como exceções pela FAA, sendo esses os voos internacionais ou domésticos que já estejam em rota no momento que o CTOP é iniciado. Então, esses voos receberão a preferência na alocação de *slots* disponíveis em cada FCA, e assim após essa alocação os demais voos serão alocados conforme o IAT na FCA de cada voo.

Um exemplo de TOS pode é apresentado na Figura 3.4, onde estão exemplificadas seis rotas para um voo; a altitude e velocidade de cada rota no decorrer da FCA; o custo

relativo da trajetória (RTC), que pode ser classificado como o limite de atraso aceito para aquela trajetória; o TVST, e o TVET, que determinam o tempo em que cada rota está válida, e o RMNT, que informa à FAA o tempo mínimo necessário para que a companhia seja informada ao ser alocada naquela rota.

Logo, podemos considerar que cada companhia aérea deverá tomar suas decisões para a criação do TOS sem conhecer a quantidade de voos que foram escolhidos para aquela demanda específica do CTOP. Com base nisso é necessário que cada companhia aérea avalie os possíveis cenários, e então tente reduzir os riscos, considerando meteorologia, custos operacionais e quantidade de conexões de determinado voo, de forma a enviar as melhores opções de trajetórias de voo.

Capítulo 4

Modelos Computacionais em ATM

Esta seção descreverá algumas pesquisas que envolvem modelos computacionais que englobam o tema desta pesquisa. A pesquisa bibliográfica realizada até o momento mostra que há temas e técnicas interessantes, atuais e de mesmo domínio, que buscam solucionar problemas relacionados ao CTOP. Foi possível verificar que a Inteligência Artificial está cada vez mais presente neste domínio e que diversas aplicações e combinações vêm sendo estudadas e utilizadas, tanto para solução, quanto para uma melhoria dos processos já existentes. Dentre as técnicas de Inteligência Artificial encontradas na literatura podemos citar: Algoritmos Genéticos, Sistemas Multiagentes, Aprendizagem por Reforço e Teoria dos Jogos.

O gerenciamento de tráfego aéreo e a escolha de melhores rotas para voos inseridos no CTOP são problemas que demandam processos de alta complexidade, esbarrando na busca de modelos computacionais com melhor eficiência, boa segurança e escalabilidade. Com base nesses conceitos, foi verificado que a busca por soluções computacionais que resolvam o problema de escolhas de trajetórias para o CTOP pode ser considerado desafiador atualmente.

4.1 Tomada de Decisão de Partidas em Aeroportos Utilizando Algoritmos Genéticos

O processo de sequenciamento de aeronaves em partidas faz parte da Gestão de Partidas, que é uma estratégia de gestão adotada no ATM para realizar em um momento pré-decolagem a distribuição dos voos em processo de decolagem em períodos de tempo de 1 a 5 minutos (*slots*).

Em cenários de atrasos e cancelamentos é então necessário que um *slot* seja realocado para outro voo, e que o voo atrasados seja realocado para outro *slot*. Este procedimento é

realizado por um sistema de sequenciamento de partidas de forma que a ineficiência deste sistema poderá gerar atrasos e filas de aeronaves para decolagens.

A pesquisa realizada em [42] e [6] foi ambientada no espaço aéreo brasileiro, onde a gestão e escolha da sequência de partidas é feita empiricamente pelos controladores de tráfego aéreo, negociando com as companhias aéreas e então gerando uma sequência *First-Come First-Served (FCFS)*.

O trabalho tomou como base o Aeroporto Internacional de Brasília - Presidente Juscelino Kubitschek (BSB), que não utiliza um sistema de *slots*. Os horários de decolagem dos voos são definidos pelo Horário de Transporte (HOTRAN) que é um documento emitido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) que define as solicitações de concessões para a exploração de linhas aéreas pelas empresas de transporte aéreo, com os horários, números de voos, frequências, tipos de aeronaves e disponibilidade de assentos.

O órgão responsável pelo controle do tempo real de chegada ou partida é o CGNA, executando a liberação de determinada aeronave para pouso ou decolagem. Quando houver atraso, se a pista de decolagem ou aterrissagem estiver livre, então a primeira aeronave que solicitar a permissão será atendida e alocada, configurando uma alocação *first-come first-served*.

Com base neste problema, foi realizada uma proposta de solução com objetivo de simulação de variadas condições nos aeroportos e o desenvolvimento de uma solução utilizando algoritmos genéticos, para então tornar eficiente o gerenciamento de partidas e aeronaves nos aeroportos, criando então um modelo de alocação dos *slots* e sequenciamento de aeronaves.

Na implementação da proposta, conforme a Figura 4.1, primeiramente foram lidos os dados de um arquivo que contém as informações dos voos, sendo realizada após a alocação inicial dos slots, servindo de entrada para o algoritmo genético. O algoritmo genético gera várias soluções e a melhor delas é encontrada, encerrando o programa.

O algoritmo genético apresentado em uma passo do fluxograma é estruturado da seguinte maneira:

- Primeiramente, é criado um cromossomo (indivíduo) a partir de uma sequência de *slots* de entrada e então os cromossomos são gerados até que a população seja grande o suficiente.
- É feita a avaliação de cada valor de aptidão (*fitness*) de cada indivíduo.
- Seleciona-se dois indivíduos, pelo método da roleta, para reproduzirem e então pelo cruzamento (*crossover*) de ambos criarem uma nova geração. Esse cruzamento também passa por uma probabilidade de ocorrência de mutação.

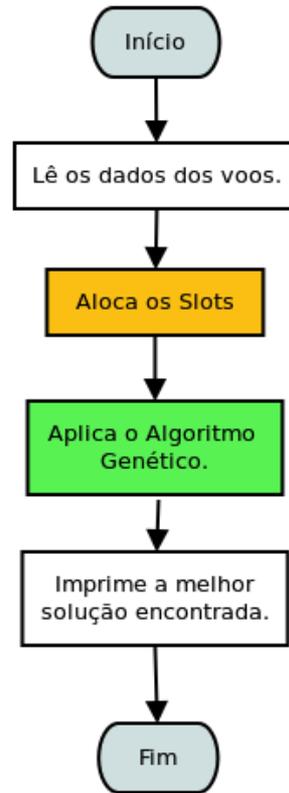


Figura 4.1: Fluxograma da proposta de solução utilizada. [6]

- O processo anterior é executado até o algoritmo gerar a quantidade necessária de filhos.
- São selecionados os melhores pais para continuar na próxima geração, descartando os piores e não selecionados.
- São criadas gerações até ser atingida a quantidade necessária de gerações e então é impressa e apresentada a melhor solução

A abordagem com Algoritmos Genéticos utilizada na solução trabalhou com uma população de 1000 indivíduos, sendo estes as possíveis soluções de sequência de partidas de voos. No decorrer do algoritmo foram executadas 100 gerações. Para verificação da sensibilidade do algoritmo genético utilizado, os autores variaram determinados parâmetros utilizados, tais como, taxa de mutação e taxa de *crossover*. Essa variação com o fim de identificar a sensibilidade também foi executada no tamanho da população e gerações.

Os testes ocorreram simulando partidas de voos durante horários de fluxo normal e de fluxo alto, para então verificar o comportamento da solução em um momento de alta requisição e em outro momento quando o atraso não é tão significativo. O horário de pico definido para estudo de caso é quando ocorre maior atraso e movimento de aeronaves,

Situação	Taxa de Mutação	Taxa de Crossover	Diferença	Diminuição
Horário de pico	0,005	0,7	7h e 32min	35%
Horário normal	0,01	0,7	4h e 40min	41%

Tabela 4.1: Execução da abordagem em situações distintas, horário de pico e horário normal. [6]

entre 08h e 12h. Já o tempo fora do horário de pico escolhido compreende os horários de 16h a 20h.

Após a execução do algoritmo e análise dos resultados, foi verificado que o atraso diminuiu significativamente para alguns casos do horário de pico sendo a diminuição ainda maior para o horário normal.

O algoritmo realoca os voos de acordo com os *slots* cancelados ou atrasados. A diminuição do atraso no horário normal é caracterizada pelo menor número de aeronaves e consequentemente uma maior disponibilidade de *slots*, logo o algoritmo genético consegue realizar mais facilmente as modificações.

Na Tabela 4.1 podemos verificar a execução e eficiência do algoritmo nas duas situações explicitadas no estudo de caso, sendo a primeira em horário de pico e a segunda em um horário de funcionamento normal. No primeiro caso houve uma redução de 35% no tempo de atraso e no segundo caso o algoritmo reduziu o tempo de atraso em 41%.

Os resultados obtidos após a aplicação da solução utilizando Algoritmos Genéticos conseguiu reduzir em 41% do total de atrasos possíveis, simulado em um ambiente de fluxo alto de voos de um dia de um aeroporto.

4.2 Abordagem *Greedy* no CTOP

Na pesquisa realizada em [5], os autores definiram um modelo para selecionar o melhor conjunto de trajetória (TOS) para cada voo inserido no CTOP, considerando a existência de múltiplas áreas restritas de fluxo (FCA's) e o processo de negociação envolvendo companhias aéreas pelos melhores *slots* disponíveis. Logo, a pesquisa foi baseada em um problema de otimização de alocação de voos de determinada companhia aérea para redução de atrasos, inserida na demanda CTOP. O modelo foi desenvolvido em dois passos utilizando a técnica de busca *greedy*.

Na figura 4.2 é possível verificar os dois passos, onde, o primeiro passo é a otimização da alocação de *slots* e o segundo passo é a otimização dos *slots* alocados para a companhia.

No primeiro passo, o módulo *Slot Allocation Optimizer*, consiste das informações de todas as companhias aéreas envolvidos com os conjuntos de aeronaves e seus respectivos horários no plano de voo aprovado no CTOP, a capacidade e demanda das FCA's deter-

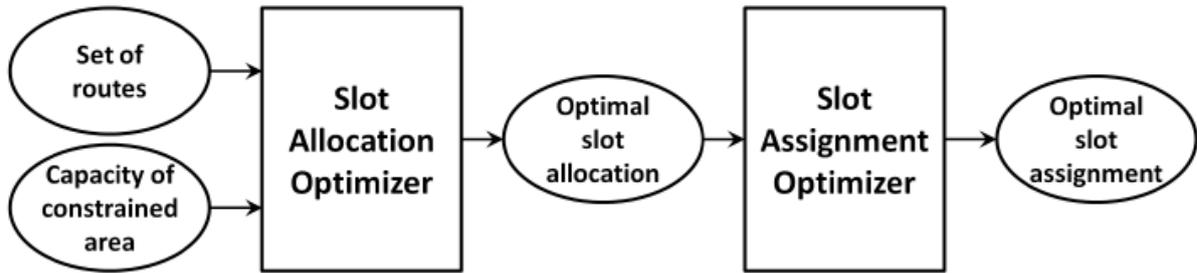


Figura 4.2: Procedimento de adaptação. [5]

minadas pela FAA e os possíveis conjuntos de rotas para cada voo. Com a entrada dessas informações, então, busca-se, para a *CompanhiaAereaA*, a melhor alocação de maneira que assegure o menor atraso possível para todos os voos capturados no CTOP.

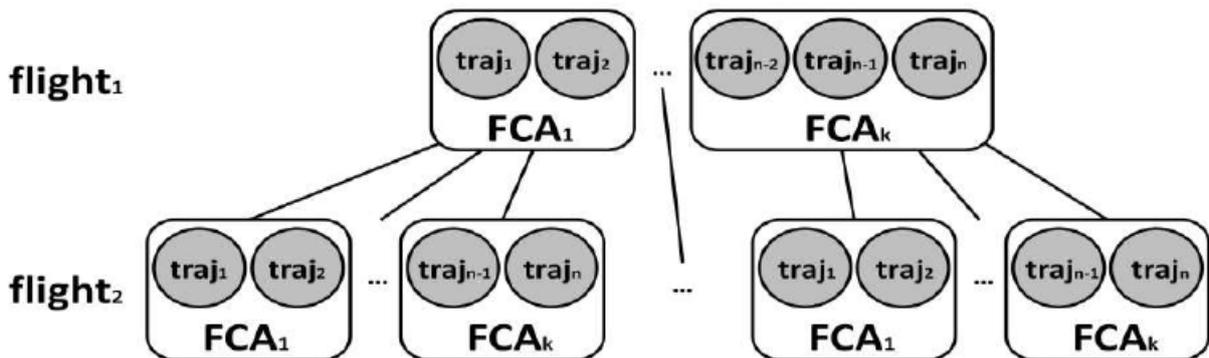


Figura 4.3: Árvore de busca agrupada por FCA. [5]

Na figura 4.3 verificamos que os autores executam uma ordenação utilizando o algoritmo do CTOP utilizado pela FAA, onde é considerado o horário mínimo de entrada do voo em cada FCA. Então, após a ordenação, a trajetória de cada voo é escolhida considerando o melhor *slot* disponível, e assim é feita a escolha até o final da lista de voos capturados no CTOP. Utilizando todas as combinações possíveis e considerando o atraso mínimo para os voos da *CompanhiaAereaA*, então é gerado o valor global de atrasos para os voos da companhia. Logo, a saída deste módulo é o melhor conjunto de trajetórias que serão enviadas para cada voo da *CompanhiaAereaA*, assim obtendo uma alocação de *slots* ótima.

De acordo com a Figura 4.4, no voo *F3* o melhor *slot* disponível seria o da *FCA1* as 08:10, mas o *slot* escolhido foi o da *FCA2* as 08:18, pois o menor atraso global é o da

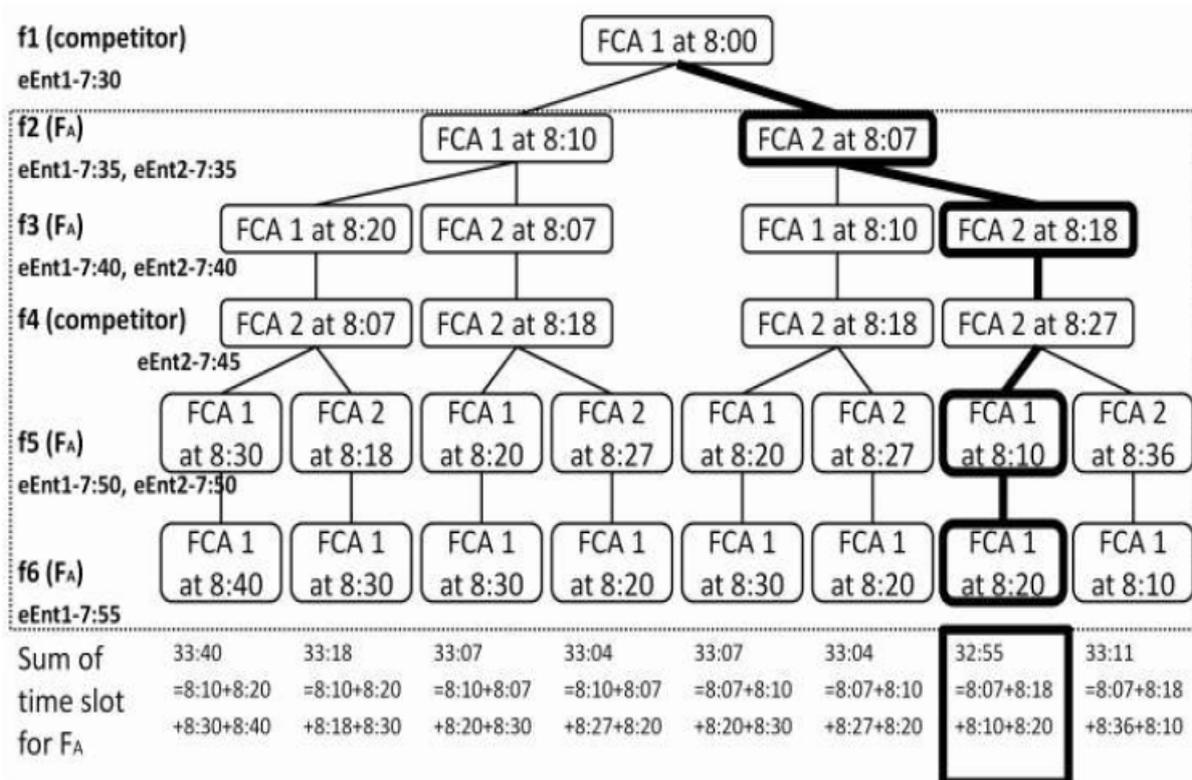


Figura 4.4: Algoritmo de busca utilizado na pesquisa *greedy* [5]

FCA2 em comparação com todas as outras possibilidades.

Então, após alocação de *slots* no primeiro passo, é gerada uma lista para entrada do segundo passo, o módulo *Slot Assignment Optimizer*, que irá gerar uma otimização da lista de alocação para a CompanhiaAereaA. A redução dos custos operacionais em cada voo envolvido é a base para a otimização, sendo outras informações utilizadas para a entrada do segundo módulo, entre elas:

- As aeronaves e seus horários no plano de voo aprovado, obedecendo a demanda CTOP, de todas as companhias aéreas envolvidas;
- Capacidade e demanda das FCAs determinadas pela FAA;
- As possibilidades de rotas para cada voo;
- O custo do voo em rota e custo de atraso em pouso e decolagem

Com base na disputa de *slots* disponíveis no voos com uma segunda companhia, executado no primeiro passo, no segundo passo os *slots* já estão definidos para cada companhia, gerando uma possível otimização na troca de *slots* somente para os voos de cada companhia.

Uma das estratégias utilizadas pelos autores para gerar otimização dos custos, foi a utilização da possibilidade de voar por fora de uma área restrita (FCA), enviando um comando *NOSLOT* no algoritmo de troca de associações no segundo módulo.

Na Figura 4.5, podemos verificar a comparação dos resultados alcançados pelos autores, com o atraso inicial para os voos capturados no CTOP, os voos alocados depois do primeiro módulo e os da lista final associada após o segundo módulo.

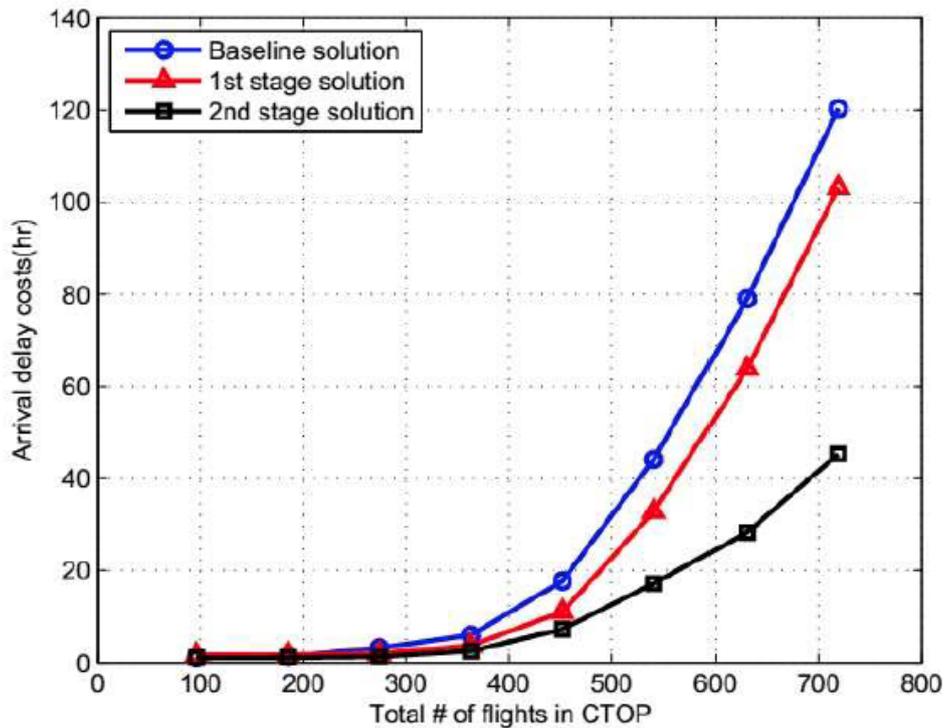


Figura 4.5: Comparação entre as soluções utilizadas. [5]

Verificamos que a solução proposta pelos autores alcançou bons resultados, enfatizando que com um maior número de voos envolvidos no CTOP os resultados se apresentaram melhores, sendo possível verificar uma redução de 60% nos custos operacionais em alguns casos.

Porém, com base no primeiro módulo, os autores usaram a premissa que os sistema de suporte à decisão conhecia todos os voos e horários para os voos utilizados no CTOP. Isso é um problema para esta utilização em um cenário real, pois de acordo com as informações do CTOP, cada companhia aérea só tem as informações dos seus próprios voos. Podemos considerar que no primeiro módulo, *Slot Allocation Optimizer*, a estratégia para definição do TOS de cada companhia aérea concorrente não é utilizada pelo algoritmo de busca.

Na execução da busca, nos voos das companhias aéreas concorrentes, é então escolhido o *slot* que permita o menor atraso para a CompanhiaAreaA. Verificando o algoritmo utilizado, é evidente que foi retirada a estratégia de *NOSLOT* para diminuição da comple-

xidade do algoritmo e a possível melhora de resultados da companhia aérea, porém não utilizar a estratégia de voar fora da área restrita, não retrata a realidade.

De acordo com as informações obtidas do primeiro e segundo módulos, podemos considerar que o conhecimento de todas as informações dentro da demanda CTOP, sendo essa premissa só disponível e conhecida pela FAA, não retrata a realidade atual em andamento nas companhias aéreas nos EUA, gerando uma dificuldade da utilização no dia-a-dia do modelo apresentado.

4.3 Modelo Utilizando Teoria dos Jogos para Sugestão de Trajetórias no CTOP

A proposta presente na pesquisa do autor em [4], foi desenvolvida utilizando Teoria dos Jogos para a sugestão de trajetórias pelas companhias aéreas para os voos capturados no CTOP. Na modelagem o autor utilizou um problema de Teoria dos Jogos, o Dilema dos Prisioneiros, conforme verificado na Figura 4.6.

Assim, foi utilizada a negociação de *slots* entre duas companhias aéreas no ambiente do CTOP, utilizando duas FCA's e com duas estratégias, sendo a primeira, o envio da melhor trajetória global, sendo a que possui o menor tempo na entrada de uma FCA, e o envio da melhor trajetória local, sendo a que possui o menor tempo em cada FCA.

		Cia. Aérea B	
		1 TOS	2 TOS
Cia. Aérea A	1 TOS	1 TOS	2 TOS
	2 TOS	2 TOS	2 TOS

Figura 4.6: Representação geral do modelo utilizado. [4]

Ao final do jogo, a combinação dos pares de jogadas resultará na quantidade de minutos de atrasos nos voos escolhidos pelo CTOP para cada companhia aérea. Baseando-se nas negociações utilizadas no CTOP, foram definidos três casos e para cada caso sete cenários. Uma visão geral dos casos e cenários podem ser verificados na Figura 4.7. Os cenários podem ser montados da seguinte maneira:

1. A *CompanhiaAereaA* tem 50% dos voos e a *CompanhiaAereaB* tem 50%.
2. A *CompanhiaAereaA* tem 67% dos voos e a *CompanhiaAereaB* tem 33%.
3. A *CompanhiaAereaA* tem 25% dos voos e a *CompanhiaAereaB* tem 75%.

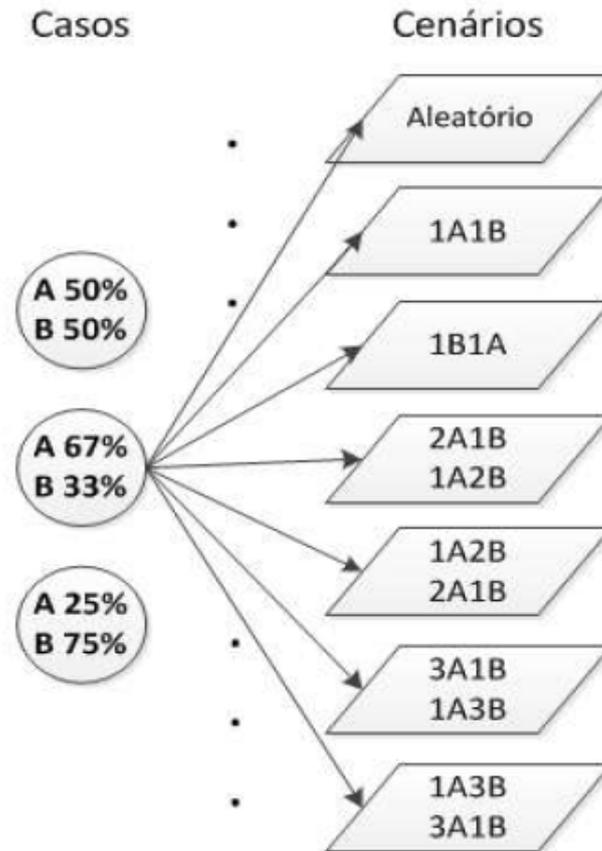


Figura 4.7: Representação geral dos casos e cenários. [4]

Então para cada estes três casos, existem sete cenários:

1. Os voos das duas companhias aéreas estão distribuídos em ordem aleatória.
2. Os voos são distribuídos da seguinte forma: 1 voo para a *CompanhiaAereaA* e 1 voo para a *CompanhiaAereaB*. Os voos restantes serão distribuídos no fim da lista.
3. Os voos são distribuídos da seguinte forma: 1 voo para a *CompanhiaAereaB* e 1 voo para a *CompanhiaAereaA*. Os voos restantes serão distribuídos no fim da lista.
4. Os voos são distribuídos da seguinte forma: na primeira metade da lista 2 voos da *CompanhiaAereaA* e 1 voo da *CompanhiaAereaB* e na segunda metade 1 voo da

CompanhiaAereaA e 2 voos da *CompanhiaAereaB*. Há possibilidade de uma companhia ter mais voos que outra, então os voos restantes serão distribuídos no fim da metade da lista os quais pertencem.

5. Os voos são distribuídos da seguinte forma: na primeira metade da lista 2 voos da *CompanhiaAereaB* e 1 voo da *CompanhiaAereaA* e na segunda metade 1 voo da *CompanhiaAereaB* e 2 voos da *CompanhiaAereaA*. Há possibilidade de uma companhia ter mais voos que outra, então os voos restantes serão distribuídos no fim da metade da lista os quais pertencem.
6. Os voos são distribuídos da seguinte forma: na primeira metade da lista 2 voos da *CompanhiaAereaA* e 1 voo da *CompanhiaAereaB* e na segunda metade 1 voo da *CompanhiaAereaA* e 2 voos da *CompanhiaAereaB*. Há possibilidade de uma companhia ter mais voos que outra, então os voos restantes serão distribuídos no fim da metade da lista os quais pertencem.
7. Os voos são distribuídos da seguinte forma: na primeira metade da lista 3 voos da *CompanhiaAereaB* e 1 voo da *CompanhiaAereaA* e na segunda metade 1 voo da *CompanhiaAereaB* e 3 voos da *CompanhiaAereaA*. Há possibilidade de uma companhia ter mais voos que outra, então os voos restantes serão distribuídos no fim da metade da lista os quais pertencem.
8. Os voos são distribuídos da seguinte forma: na primeira metade da lista 3 voos da *CompanhiaAereaA* e 1 voo da *CompanhiaAereaB* e na segunda metade 1 voo da *CompanhiaAereaA* e 3 voos da *CompanhiaAereaB*. Há possibilidade de uma companhia ter mais voos que outra, então os voos restantes serão distribuídos no fim da metade da lista os quais pertencem.

De acordo com o autor do modelo, os casos e cenários representados resumem o comportamento da proporção e quantidade de voos, conforme a realidade do tráfego aéreo referente ao tempo de execução da pesquisa. Assim, no final de cada jogo existem 21 possíveis combinações de casos e cenários, juntamente combinados com os movimentos possíveis de cada companhia aérea possibilitam em 84 resultados finais. Utilizando a função *payoff*, onde cada jogador irá verificar o ganho de cada possível jogada, é definida pelo autor como:

$$Atraso(C,S,MA,MB) = x$$

Onde a função é representada por: $Atraso(C,S,M) =$ atraso estimado em minutos x para cada combinação de caso, cenários e movimentos para cada companhia.

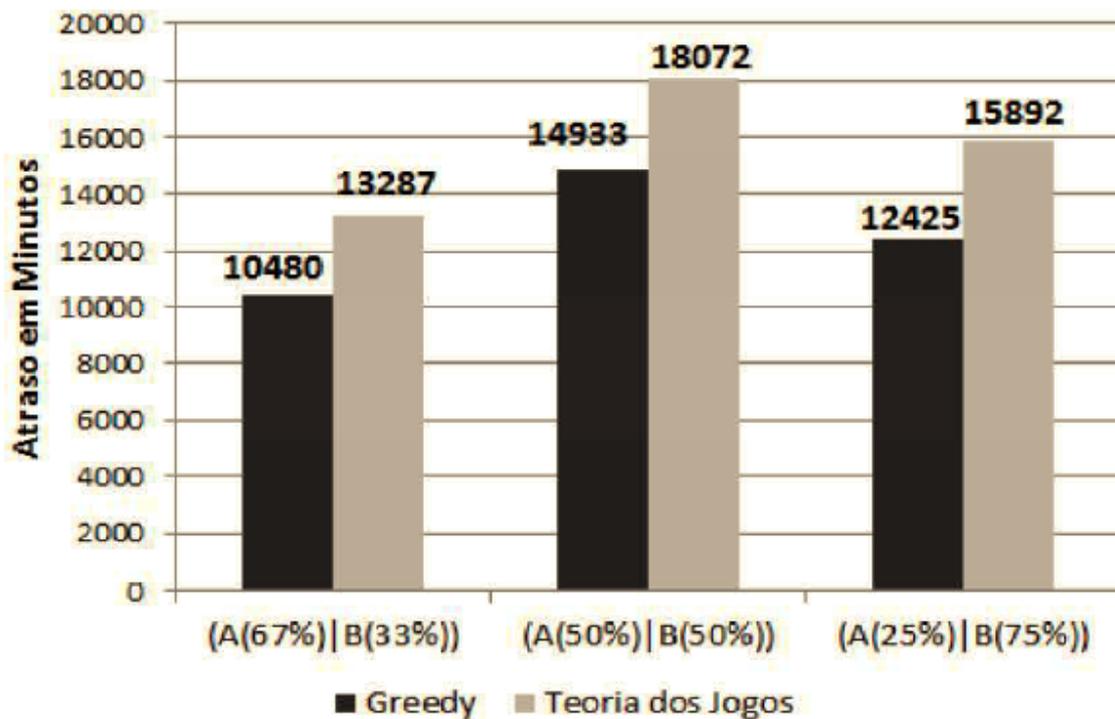


Figura 4.8: Comparativo do atraso em minutos em cada abordagem. [4]

Os resultados alcançados pelos autores, foram bem relevantes para o cenário de CTOP abordado no tempo da pesquisa. A abordagem utilizando Teoria dos Jogos mostrou resultados satisfatórios para o problema apresentado, sem a necessidade de considerar premissas não reais para a prática da pesquisa, diferentemente do modelo teórico apresentado pela abordagem *greedy*, que utiliza a premissa que a CompanhiaAereaA tem a informação e conhecimento de todos os voos e horários capturados no CTOP. Sendo que essa informação só é verificada detalhadamente pela FAA.

Na Figura 4.8 é possível verificar a comparação dos resultados finais entre as abordagens *greedy* e com Teoria dos jogos, onde é explicitado o atraso global, para três casos abordados dos voos da CompanhiaAereaA.

- Verificando o caso que a CompanhiaAereaA tinha 67% dos voos e a CompanhiaAereaB 33%, foi constatado que a melhor estratégia para a CompanhiaAereaA seria enviar duas opções de trajetórias, sendo uma para cada FCA. O melhor caso verificado foi quando duas trajetórias pela A são enviadas e apenas uma trajetória é enviada pela CompanhiaAereaB, pois a CompanhiaAereaB possui menor preferência no momento da alocação. Assim, nesta abordagem utilizando Teoria dos Jogos, a CompanhiaAereaA obteve um atraso maior que a

abordagem *greedy*, entre 16% e 27% nos voos rastreados e 21% e 26% considerando todos os voos capturados.

- No caso em que a CompanhiaAereaA tinha 50% dos voos e a CompanhiaAereaB 50%, foi constatado que a melhor estratégia para a CompanhiaAereaA seria enviar duas opções de trajetórias, sendo uma para cada FCA. O melhor caso verificado foi quando duas trajetórias pela A são enviadas e apenas uma trajetória é enviada pela CompanhiaAereaB, pois a CompanhiaAereaB possui menor preferência no momento da alocação. Assim, nesta abordagem utilizando Teoria dos Jogos, a CompanhiaAereaA obteve um atraso maior que a abordagem *greedy*, entre 17% e 22% nos voos rastreados e 17% e 23% considerando todos os voos capturados.
- No caso em que a CompanhiaAereaA possuía 25% dos voos e a CompanhiaAereaB 75%, foi constatado que a melhor estratégia para a CompanhiaAereaA seria enviar uma opção de trajetória, sendo uma para cada FCA. O melhor caso ocorre quando é enviada apenas uma trajetória pela A e duas trajetórias são enviadas pela CompanhiaAereaB, pois a CompanhiaAereaB possui menor preferência no momento da alocação. Assim, nesta abordagem utilizando Teoria dos Jogos, a CompanhiaAereaA obteve um atraso maior que a abordagem *greedy*, entre 16% e 22% nos voos rastreados e 21% e 23% considerando todos os voos capturados.

4.4 Teoria dos Jogos para Otimização de Alocação de *Slots* no CTOP

No trabalho realizado em [7], foi apresentado um sistema para auxílio na automatização da alocação eficiente de voos servindo como um DSS no CTOP aplicado ao espaço aéreo brasileiro utilizando Teoria dos Jogos, onde as companhias aéreas possam negociar entre si os *slots* definidos pelo CTOP. O protótipo desenvolvido também auxiliou na otimização do ATM, buscando a redução do tempo de atrasos.

Foi utilizada uma definição para configurar o método de negociação dos voos entre as companhias aéreas na abordagem de Teoria dos Jogos. Essa negociação de *slots* começa quando o CTOP gera a lista final e esse processo entre as companhias aéreas deverá diminuir os atrasos e priorizar os voos mais importantes, sendo vista na abordagem como um jogo onde as companhias aéreas disputam os *slots*.

Foram definidas que duas companhias aéreas iriam participar do jogo utilizando como critério principal os atrasos dos voos, sendo estes divididos em dois tipos:

- **Atraso Global:** é a soma do atraso de todos os voos incluídos no jogo pela companhia aérea.
- **Atraso prioritário:** é a soma do atraso de todos os voos prioritários no jogo pela companhia aérea. Os voos prioritários são os voos em que as companhias aéreas têm prioridade, tais como os voos que são muito importantes e devem ter o menor atrasos possível, voos que têm escalas por exemplo.

Na abordagem tradicional de alocação de *slots* do CTOP os voos prioritários das companhias aéreas não são considerados, sendo todos os voos tratados como normais e é considerado para efeito de ordenação dos voos o horário de IAT. A abordagem proposta pelos autores utilizando Teoria do Jogos também considerou os voos prioritários das companhias aéreas e as preferências de alocação de *slots* para então possibilitar um menor impacto nos atrasos dos voos.

Inicialmente o jogo é configurado como uma disputa de *slots* entre as companhias aéreas de forma que cada cada companhia aérea irá barganhar com a outra para então obter os melhores *slots*. O jogo caracteriza-se por utilizar o conceito de Barganha de Nash, onde cada barganha é uma rodada do jogo.

Após a execução do CTOP uma companhia aérea fará uma barganha para a outra companhia aérea informando as suas preferências de *slots* correspondente à definição de TOS do CTOP. Se houver aceitação da companhia que recebeu a barganha no jogo então é terminada a negociação, no entanto se houver rejeição é proposta uma nova barganha.

Juntamente com a barganha de Nash foi utilizado também o Teorema de Folk. Neste caso o Teorema de Folk define que as várias repetições de um jogo permitem que todos os resultados possíveis sejam apresentados como uma representação de um equilíbrio de Nash e recompensas. Também foram utilizadas sucessivas repetições do jogo, medindo a recompensas pelo histórico das barganhas, ou seja, se foram aceitadas ou rejeitadas. De acordo com a quantidade de vezes que determinada companhia aérea rejeita as proposições da companhia concorrente, se determinado valor de rejeição for alto, então a companhia poderá rejeitar a barganha da concorrente antes de analisar tal proposta.

Para tornar justo um alto nível de rejeição, a companhia com um alto nível de rejeição da proposta da companhia concorrente será obrigada a aceitar as propostas que foram lançadas. Logo, essa configuração de abordagem tem como objetivo o incentivo da cooperação entre as companhias aéreas, tornando as negociações justas e amigáveis.

O modelo da negociação utilizada no estudo foi definido da seguinte forma:

1. **Carga dos voos e definição dos voos prioritários:** Primeiramente são escolhidos os voos que serão trabalhados na abordagem, ou seja, é escolhida uma janela

de horários que será iniciado o CTOP juntamente com a escolha dos voos que serão prioritários;

2. **Início do jogo:** É iniciado o jogo e então é executada uma negociação pelas companhias aéreas;
3. **Verificação da lista do CTOP:** É verificada a lista final de voos e alocação feita pelo algoritmo do CTOP.
4. **Verificação do histórico de jogadas:** Nesta etapa o histórico de jogadas é verificado para então obter a taxa de aceitação e rejeição das jogadas realizadas;
5. **Geração de estratégias e lista final do jogo:** São definidas estratégias de jogadas que podem ou não utilizar o histórico de jogadas já realizadas. Logo após tal processo é gerada uma lista com as negociações executadas.

O Algoritmo 1 define o algoritmo utilizado na negociação das companhias aéreas.

Algoritmo 1: Algoritmo do Jogo [7]. (*Com adaptações.*)

```
início
|
|   para Início da janela de tempo até Fim da janela de tempo faça
|   |
|   |   enquanto Rodada não é a máxima ou Proposta não for aceita faça
|   |   |
|   |   |   seleciona os voos
|   |   |   seleciona os slots
|   |   |   jogador cria uma nova proposta e manda para competidor
|   |   |   se a taxa de rejeição do competidor e jogador é aceitável então
|   |   |   |   se a proposta de atraso prioritário e atraso global são aceitáveis
|   |   |   |   |   então
|   |   |   |   |   |   aceita a proposta
|   |   |   |   |   fim
|   |   |   |   |   senão
|   |   |   |   |   |   rejeita a proposta
|   |   |   |   |   fim
|   |   |   |   fim
|   |   |   |   senão
|   |   |   |   |   rejeita a proposta
|   |   |   |   fim
|   |   |   fim
|   |   |   se proposta não foi aceita então
|   |   |   |   utilizar resultado do CTOP
|   |   |   fim
|   |   fim
|   fim
fim
```

O autor definiu alguns tipos de estudo de caso para então executar a proposta. O algoritmo do CTOP com a Negociação por Teoria dos Jogos foi executado 100 vezes para cada caso. Os casos foram divididos da seguinte maneira:

- Caso 1: A Companhia aérea A com a mesma quantidade de voos da Companhia aérea B. 50%/50%
- Caso 2: A Companhia aérea A com menor quantidade de voos da Companhia aérea B. 37%/33%
- Caso 3: A Companhia aérea A com a mesma quantidade de voos da Companhia aérea B. 25%/75%

No caso 1, conforme as Figuras 4.9 e 4.10, foi observado que no caso dos atrasos globais, os valores finais de atraso da solução utilizando Teoria dos Jogos não diferenciaram

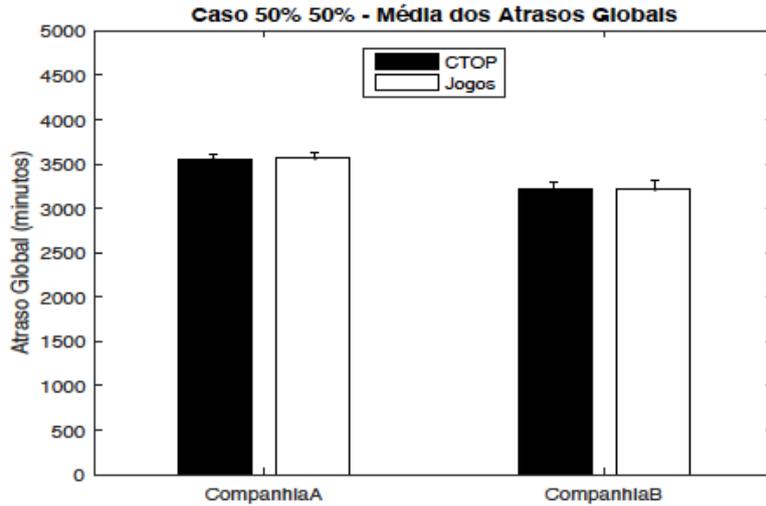


Figura 4.9: Média dos atrasos globais. [7]

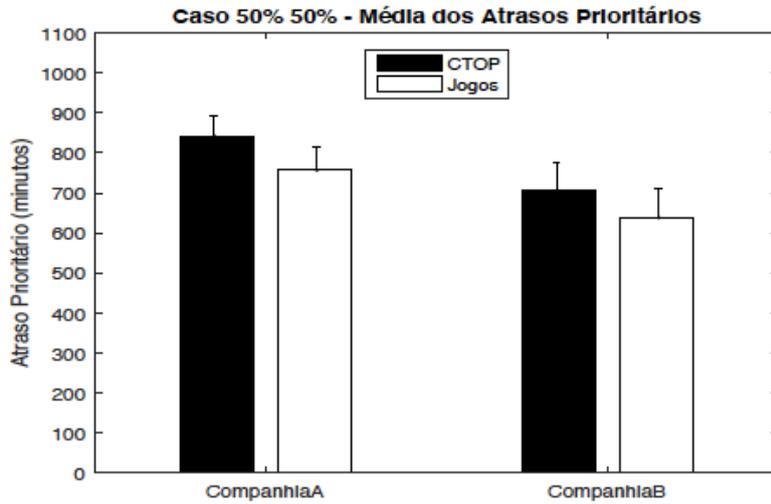


Figura 4.10: Média dos atrasos de voos prioritários. [7]

tanto na comparação com o atraso da Alocação Geral do CTOP. Porém quando foi aplicado a proposta de Teoria dos Jogos em um ambiente com voos prioritários ocorreu uma disparidade com a Alocação Geral do CTOP nos valores finais de atraso.

Esse comportamento de diminuição dos atrasos prioritários com a aplicação de Teoria dos Jogos, conforme a tabela 4.2, manteve-se diante de todos os outros casos de estudos propostos, Caso 2 e Caso 3, onde a distribuição dos voos entre as Companhias Aéreas são diferentes.

Comparado com o algoritmo de alocação do CTOP, o algoritmo com Teoria dos Jogos conseguiu redução de até 35% dos atrasos prioritários.

	Companhia Aérea A	Companhia Aérea B
	Redução (%)	Redução (%)
Caso 1 (50%/50%)	24,14	22,64
Caso 2 (67%/33%)	35,29	18,12
Caso 3 (25%/75%)	34,41	19,30

Tabela 4.2: Melhores resultados dos Atrasos Prioritários com Teoria dos Jogos. (*Com adaptações*) [7]

Capítulo 5

Modelagem

O modelo proposto neste trabalho tem como objetivo uma melhor alocação de *slots* dos voos capturados no CTOP, proporcionando para as companhias aéreas e aos órgãos fiscalizadores responsáveis pelo controle de tráfego aéreo uma diminuição no atraso dos voos.

Foi desenvolvida uma proposta de resolução do problema enaltecido durante esta dissertação e a aplicação do CTOP utilizando os dados do espaço aéreo brasileiro. A seção 5.1 apresenta uma possível utilização do CTOP no espaço aéreo brasileiro. A seção 5.2 apresenta uma aplicação do CTOP para alocação *slots* e voos ambientados no Brasil. A seção 5.3 apresenta a proposta de AG para otimização da aplicação do CTOP. A seção 5.4 apresenta a modelagem e representação do AG proposto para otimização. A seção 5.5 um modelo da aplicação do CTOP otimizada com AG.

5.1 Utilização do CTOP no Espaço Aéreo do Brasil.

Por ser um programa atual e implementado há pouco anos no espaço aéreo norte-americano, há a necessidade de busca e desenvolvimento de melhorias para atender eventuais problemas que possam ocorrer na atual aplicação do CTOP.

Pelo sucesso da atual utilização do CTOP no espaço aéreo norte-americano, podemos constatar que pode ser aplicado em outros países. Foi verificado que pode ser aplicada a utilização do CTOP no Brasil, onde foi constatado que até os dias atuais ainda não foi implantando no espaço aéreo brasileiro. Partindo dessa premissa, um estudo inicial pode ser implementado considerando de forma ajustada as demandas do espaço aéreo americano para o espaço aéreo brasileiro, ou seja, os conceitos e necessidades das companhias aéreas podem ser verificadas, com o objetivo de melhorar o negócio dos agentes envolvidos no ambiente do espaço aéreo brasileiro.

Seguindo a proposta e informações levantadas, podemos então modelar a implantação do CTOP no espaço aéreo do Brasil. As justificativas para tal implementação podem ser verificadas nas seguintes premissas:

- A implantação do CTOP poderá auxiliar o gerenciamento de tráfego aéreo no Brasil, auxiliando no processo de tomada de decisão dos órgãos competentes com assuntos pertinentes à rotas exclusivas de determinadas companhias aéreas;
- As companhias aéreas brasileiras têm interesses de negócios semelhantes às companhias aéreas americanas, onde é buscada a eficiência, e a diminuição de custos operacionais e de atrasos;
- A estrutura do espaço aéreo norte-americano se assemelha em alguns pontos com a estrutura do espaço aéreo brasileiro, como podemos verificar a divisão das FIRs no Brasil na Figura 3.1 e na Figura 3.2 as divisões das *Air Route Traffic Control Centers* (ARTCCs) no EUA. Com as devidas divisões pode ser possível a implementação do CTOP no espaço aéreo brasileiro.
- A semelhança entre os órgãos detentores de informações acerca dos voos e horários de partidas também pode ser considerada, onde no Brasil o responsável pelo ATFM é CGNA, organizando em nível estratégico, pré-tático e tático.

5.2 Aplicação do CTOP para Alocação de *Slots*

Para obtermos uma otimização dos *slots* utilizados no CTOP, devemos primeiramente modelar uma aplicação do algoritmo do CTOP, de forma que seja possível uma simulação com dados de voos ambientados em um espaço aéreo.

A aplicação modelada poderá no final da execução alocar os voos capturados no CTOP e então realizar a alocação dos *slots* definidos, seguindo o algoritmo do CTOP. Esta aplicação irá gerar ao final a lista de voos capturados no CTOP e alocados, sendo que essa informação é disponibilizada para o órgão responsável, neste caso o DECEA.

Conforme a Figura 5.1 foram definidos alguns passos para o fluxo e tomada de decisão da aplicação:

1. Na Alocação Inicial, antes da execução do algoritmo do CTOP, são levantados e gerados alguns dados para entrada do algoritmo. Com a demanda do CTOP iniciada deverão ser definidas as FCA's utilizadas na demanda em questão;
2. Com o início do CTOP e definição das FCA's, as companhias aéreas enviam ao órgão responsável o TOS com suas preferências de rotas;

3. O órgão responsável então decide os voos incluídos no CTOP e então avalia as preferência de rotas enviadas pelas companhias aéreas via TOS.
4. Após é executado o algoritmo do CTOP conforme o Algoritmo 2. Os voos, *slots* e os horários de EAT dos voos, são passados como entrada do algoritmo.
5. Os voos são ordenados pelo tempo de EAT, gerando a lista de voos ordenados por IAT.
6. Com os *slots* definidos os voos ordenados por IAT são alocados. Após a alocação, a lista final de voos alocados é gerada.

Para construção do modelo e execução dessa aplicação algumas premissas foram assumidas:

- O CTOP será iniciado com duas FCA's.
- Serão capturados os voos de duas companhias aéreas, denominadas *Companhia Aérea A* e *Companhia Aérea B*
- Na etapa de alocação de *slots* no algoritmo do CTOP os voos que tiverem mais de 30 minutos de atraso serão classificados como NOSLOT, ou seja, será feita a opção de trajetória de voo por fora da FCA.

Algoritmo 2: Algoritmo do CTOP.

Entrada: Voos, *Slots*, Horário de EAT dos Voos

início

 Ordenação dos Voos por IAT;

 Alocação dos Voos de Acordo com a Lista de IAT e *Slots* Disponíveis;

 Geração da Lista Final de Voos do CTOP;

fim

Saída: Lista Final de Voos do CTOP

5.3 Proposta de Algoritmo Genético para Otimização da Alocação de *Slots* no CTOP

Conforme discutido ao longo do texto, com crescimento de acesso e facilidade aos meios de transporte aéreo, necessita-se cada vez mais de sistemas robustos, abrangentes e precisos que garantam a segurança e mantenham os principais objetivos do ATM. Esses sistemas se caracterizam por possibilitar com que se mantenha a segurança no espaço aéreo e que isto se sobressaia com relação a outros fatores operacionais, como atrasos ou cancelamentos, alterações nos planos de voo, dentre outros. Porém, surge o problema de como elevar ou

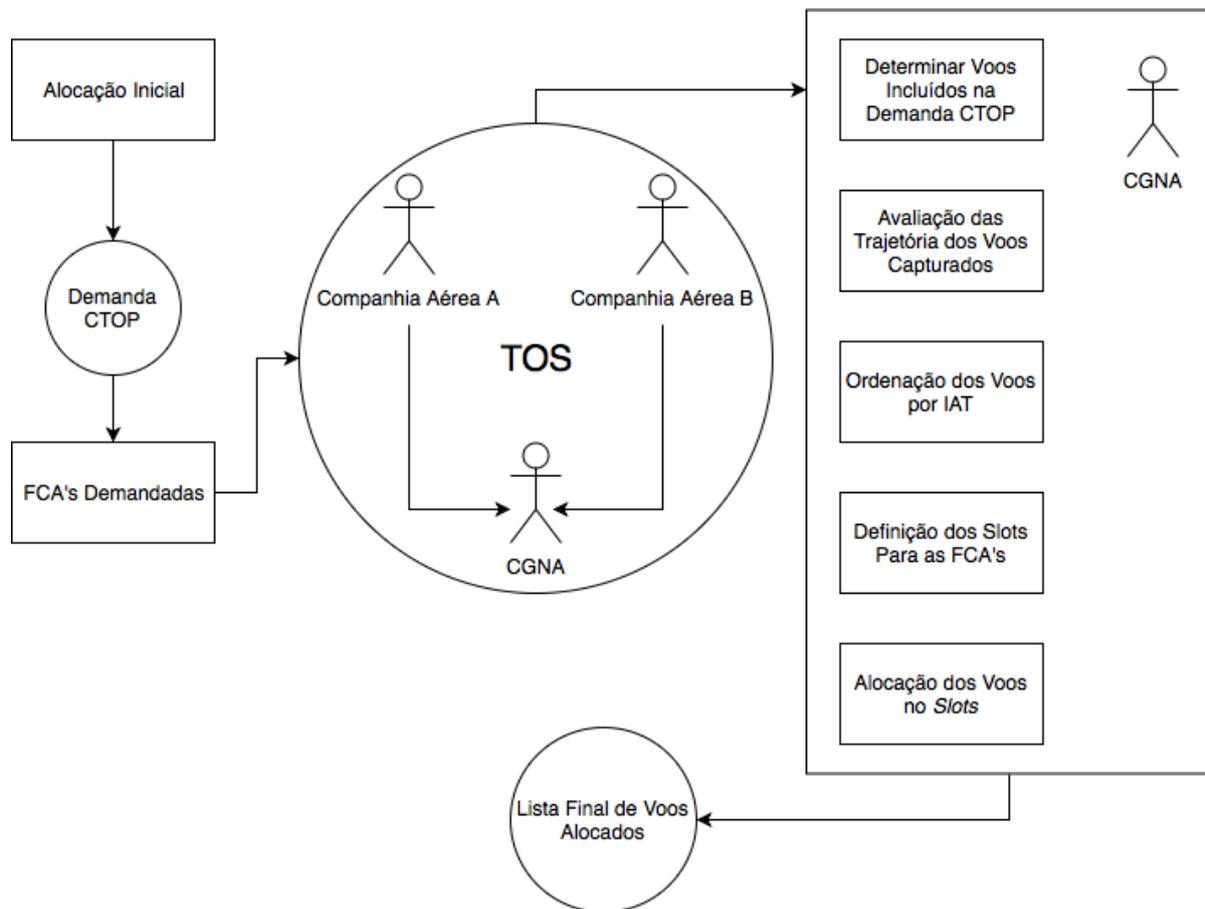


Figura 5.1: Modelo da Aplicação do CTOP.

manter os níveis de segurança no espaço aéreo, lidando com as situações de riscos que possam ocorrer, melhorando outros fatores como, redução de atrasos em voos, redução dos custos operacionais, entre outros.

Conforme citado no Capítulo 3, existe o programa CTOP, que pertence à uma iniciativa da FAA, o qual visa melhorar o ATM considerando os usuários do NAS e seus objetivos de negócio, as questões enfrentadas em cada voo e as restrições do espaço aéreo. Assim, possibilitando o envio de preferências de rotas pelas companhias envolvidas no CTOP, tornando o processo de ATM mais flexível e negocialmente estável para as companhias aéreas. Como foi apresentado no Capítulo 4, é essencial que haja uma solução ou ferramenta para as companhias aéreas e órgãos fiscalizadores responsáveis para realizar estimativas sob a incerteza envolvida no CTOP, buscando um conjunto ótimo de *slots* e voos capturados no CTOP. Essa estratégia é necessária, pois com a escolha correta é possível a diminuição de atrasos de voos, com um melhor posicionamento na fila de *slots* disponíveis, gerando diminuição de custos operacionais e contribuindo para melhores resultados de negócio.

Nesse contexto, existem diversas propostas de resolução do problema de estratégias

para o envio de trajetórias de voos e alocação de *slots*, conforme descrito no Capítulo 4, onde os autores utilizam o desenvolvimento de soluções baseadas em algoritmos inteligentes utilizando Sistemas Multiagentes, Teoria dos jogos e algoritmos com busca *greedy*. Com base nessas propostas, foi então realizado uma revisão e análise comparativa entre elas, onde foi possível verificar que na proposta *greedy* [5], em uma negociação de *slots* entre as companhias aéreas, o autor assumiu que a *CompanhiaAereaA* terá sempre prioridade para escolher quais as melhores trajetórias de negociação, assim a *CompanhiaAereaB* só receberá o *slot* disponível se a *CompanhiaAereaA* não quiser, logo esse cenário não retrata a realidade das companhias aéreas em uma disputa de *slot*.

É por isso que se propõe como tema para a dissertação de mestrado o desenvolvimento de uma proposta de solução utilizando Algoritmos Genéticos com o intuito de obtermos o melhor conjunto de *slots* de uma demanda CTOP. Tal algoritmo e aplicação utilizará como base os dados e informações de voos e rotas do espaço aéreo brasileiro, possibilitando a criação deste modelo para eventuais utilização do CTOP no Brasil.

No fim da aplicação proposta, será sugerido e disponibilizado um conjunto de *slots* ótimo para o órgão responsável do controle de tráfego aéreo realizar a alocação de *slots* dos voos capturados no CTOP.

5.4 Modelagem e Representação do Algoritmo Genético

Para resolução do problema utilizando Algoritmos Genéticos, é necessário uma representação genética do domínio de solução do problema e uma função de avaliação para avaliar o domínio de solução utilizado. Esta seção descreverá o modelo e a representação genética utilizada na solução de algoritmos genéticos. Serão descritas as estruturas utilizadas, tais como: gene, cromossomo, população e operadores genéticos.

5.4.1 Gene

Nesta solução, os horários dos *slots* formam os genes. Como um *slot* é o intervalo de tempo que determinada aeronave pode entrar em uma FCA, então definimos que os genes de um cromossomo da solução será definido pelo horário do *slot*, ou seja, será hora, minuto ou segundo.

A Figura 5.2 exemplifica a representação de gene utilizada no modelo proposto, onde é possível verificar que cada *slot* contém um horário atribuído, sendo esta divisão de horário a representação de gene.

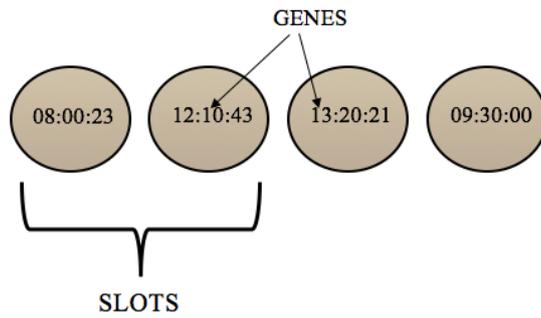


Figura 5.2: Estrutura dos genes e cromossomos..

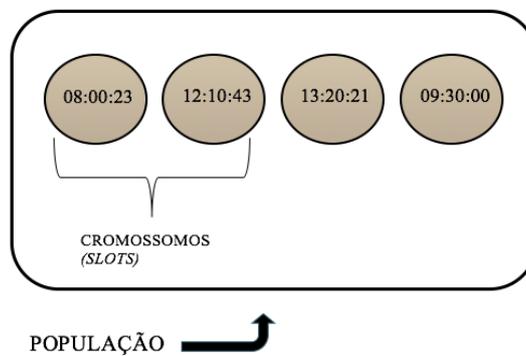


Figura 5.3: Estrutura dos cromossomos e população..

5.4.2 Cromossomo ou Indivíduo

A representação do cromossomo ou indivíduo da solução será cada *slot* da demanda CTOP utilizada. Cada cromossomo (*slot*) será composto por genes (horários). As Figura 5.2 e 5.3 apresentam as estruturas dos cromossomos na solução proposta. Na primeira representação é possível verificar a composição de genes do cromossomo e na segunda representação é apresentada a alocação de um cromossomo inserido em uma população.

5.4.3 População

Definimos que a população do algoritmo é formada pelo conjunto de todos os *slots*, incluindo os *slots* com voos alocados e os *slots* com voos não alocados. Com base nessa definição, cada *slot* corresponde a um indivíduo.

5.4.4 Operadores Genéticos

Esta subseção descreverá a representação dos operadores genéticos utilizado na proposta de solução.

Mutação

O operador de genético de mutação utilizado na solução proposta irá executar uma mutação com probabilidade P_M de ocorrer em cada indivíduo da geração corrente. A mutação irá somar ou subtrair um intervalo de até 30 minutos no gene de minuto do cromossomo. No exemplo a seguir ocorreu uma mutação no cromossomo, que soma 25 minutos no gene de minuto do cromossomo:

- Antes da Mutação: 20:22:00
- Após a Mutação: 20:47:00

Cruzamento (*Crossover*)

O *crossover* utilizado na solução proposta será do tipo uniforme, pois um indivíduo irá herdar do indivíduo pai algumas faixas de horário (hora, minuto ou segundo). Essa herança genética possibilita que a diferença genética entre o filho e pai seja apenas por poucos genes, ou seja, na representação do domínio do problema poderia ser uma diferença entre minutos, de acordo com o exemplo a seguir:

- PAI: 12:50:23
- FILHO: 12:52:23

O indivíduo irá herdar os genes de somente um pai com uma probabilidade P_C . O restante da codificação genética (ou os genes restantes) são gerados aleatoriamente de acordo com o gene anterior. Por exemplo, irá existir uma função que irá somar ou subtrair um intervalo de até 2 minutos do gene de minuto do filho com relação ao gene de minuto do pai. Se o gene de minuto do pai for 30 então o gene de minuto do filho poderá ser 28, 29, 30, 31 ou 32. Esse intervalo aproximado de 2 minutos entre os horários dos genes dos pais e filhos segue uma recomendação de segurança de distanciamento entre aeronaves de médio e grande porte, apresentada em [43].

Será utilizado o método da seleção elitista para selecionar os indivíduos da população. Para a construção da próxima geração R são selecionados os $N | P \geq N \geq 1$ indivíduos com melhor aptidão na população P para comporem a geração R. O restante da população R é gerado com a aplicação dos operadores de cruzamento e mutação, com base nos *slots*

não aptos da geração P, onde a criação do indivíduo é a soma de um intervalo de 2 minutos para mais ou para menos tomando como base a informação de horário do *slots* correspondente ao indivíduo não apto na geração passada P.

A execução do algoritmo irá acontecer até a convergência ou até que o algoritmo alcance um número de gerações definido.

5.4.5 Função de Aptidão (*Fitness*)

Um dos objetivos do modelo proposto é a diminuição de atraso na alocação dos voos capturados no CTOP nos *slots* utilizados na demanda CTOP. Com base a função de aptidão deverá se aproximar desse objetivo, verificando quais indivíduos seguem esta proposta.

Essa função de aptidão é aplicada após a alocação dos voos ser feita no conjunto de *slots*, utilizando o algoritmo geral de alocação de *slots* do CTOP, descrito no Capítulo 3. O atraso de cada *slot* (cromossomo), é calculado da seguinte forma:

$$A_{slot} = t_{voo} - t_{slot} \quad (5.1)$$

$$A_{slot} = \begin{cases} 1, & set_{voo} - t_{slot} = 0 \\ t_{voo} - t_{slot}, & t_{voo} - t_{slot} \neq 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

A Equação 5.1 é utilizada para obtermos o atraso de cada *slot* após a alocação de um voo. Na fórmula t_{voo} corresponde ao horário que o voo irá entrar na FCA correspondente e t_{slot} corresponde ao horário do *slot*. Logo a diferença entre os horários é o tempo de atraso que um voo entra em uma FCA e conseqüentemente é alocado. Conforme descrito na equação não há diferença se o valor da diferença do atraso for igual a 0 minutos ou 1 minuto.

A função de aptidão aplicada no indivíduo antes da criação de uma nova geração é definida na equação 5.3. O valor de aptidão (*fitness*) poderá variar entre valores de 0 até 1, sendo 1 a melhor aptidão.

$$f = \frac{1}{A_{slot}} \quad (5.3)$$

5.4.6 Algoritmo da Proposta de AG

De acordo com a representação do AG ambientando no CTOP e utilizando as definições pertinentes para a busca de um conjunto ótimo de *slots*, o algoritmo utilizando a aborda-

gem de AG proposto para solução será modelado e implementado conforme o Algoritmo 3, descrito a seguir.

Algoritmo 3: Algoritmo Genético proposto para solução.

início

inicialização da população P de indivíduos;

Alocação dos voos nos *slots* de P ;

Avaliação dos indivíduos na população P ;

repita

para cada *indivíduo que pertence ao conjunto dos N melhores de P* **faça**

 Copie o indivíduo em P' ;

fim

para cada *indivíduo que pertence ao conjunto dos $P-N$ piores de P* **faça**

 Aplique operador genético de cruzamento com probabilidade P_c ;

 Aplique operador genético de mutação com probabilidade P_m ;

fim

Alocação dos voos nos *slots* de P' ;

Avalie indivíduos gerados na população P' ;

$P \leftarrow P'$

até *objetivo final ou máximo de gerações*;

fim

5.5 Otimização com Algoritmos Genéticos na Aplicação do CTOP

De acordo com o modelo de Algoritmo Genético para busca de um conjunto ótimo de *slots* será proposta a otimização da Aplicação do CTOP apresentada anteriormente. Conforme a Figura 5.4 o AG será executado na etapa de definição do conjunto de *slots* necessário para a alocação dos voos, com o intuito de buscar o melhor conjunto de *slots*, otimizando a próxima etapa de alocação dos voos. Desta maneira, os seguintes passos serão utilizados na otimização da aplicação proposta:

1. A Aplicação do CTOP será executada conforme descrito na Seção 5.2;
2. Na etapa de definição do conjunto de *slots* o AG é iniciado;
3. De acordo com o AG proposto na Seção 5.4, a entrada do AG é um conjunto de *slots*, que servirá para criação da população inicial do AG.

4. O AG é executado até o final das gerações definidas e então é feita a busca do melhor conjunto de *slots* que será sugerido para entrada do algoritmo de alocação do CTOP, gerando a lista final de voos alocados.

Para o desenvolvimento da otimização foram assumidas as seguintes premissas:

- Foram definidas duas FCA's.
- Serão utilizadas duas companhias aéreas para envio da preferência de rotas de voos e captura de voos do CTOP, *Companhia Aérea A* e *Companhia Aérea B* conforme a Aplicação do CTOP;
- Na etapa de alocação de *slots* no algoritmo do CTOP os voos que tiverem mais de 30 minutos de atraso serão classificados como NOSLOT, sendo feita a opção de trajetória de voo por fora da FCA.
- A população da primeira geração do AG será o conjunto de *slots* definido pelo órgão responsável.

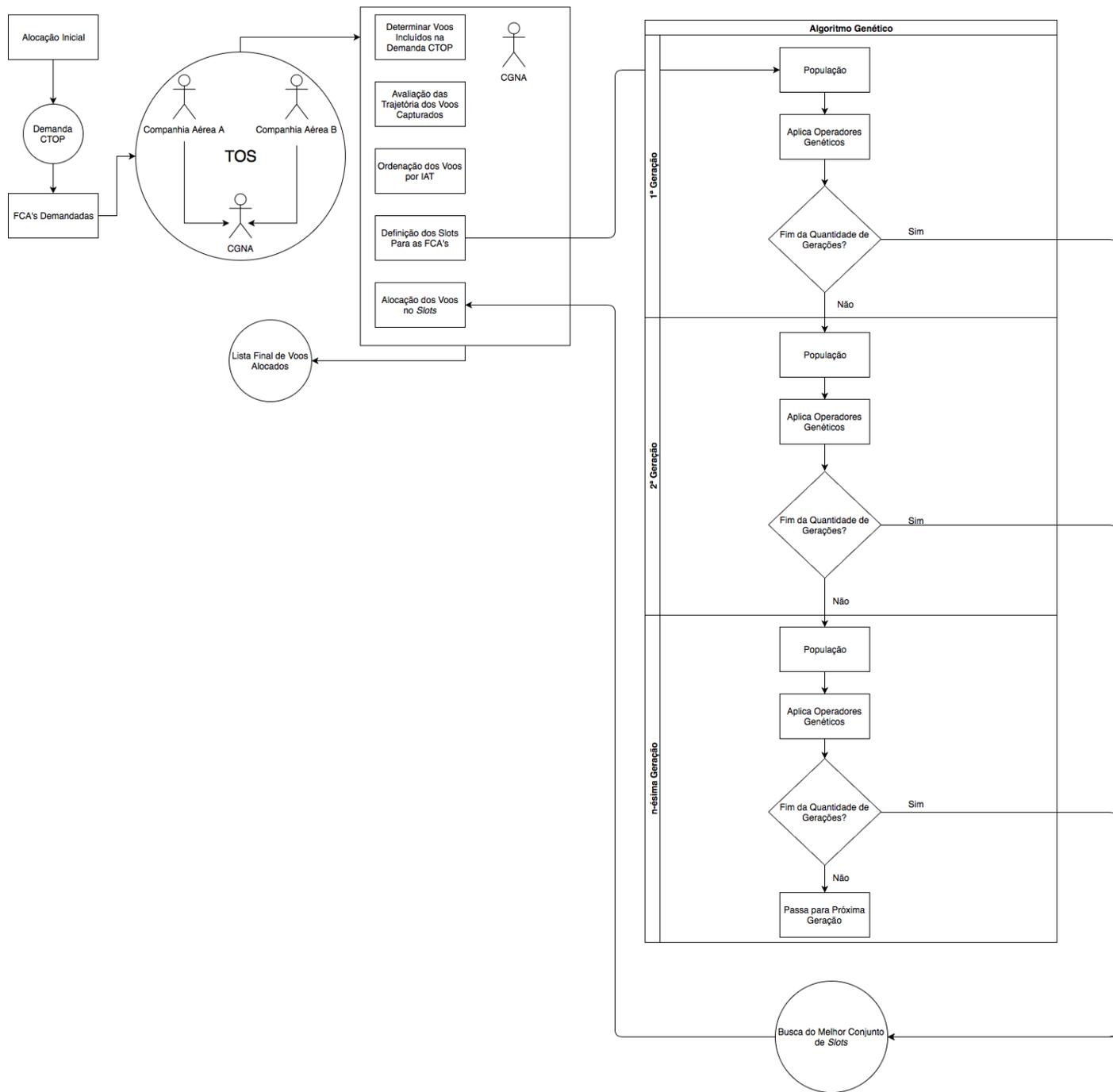


Figura 5.4: Modelo da Aplicação de Otimização do CTOP com Algoritmos Genéticos.

Capítulo 6

Arquitetura e Implementação

Este capítulo irá detalhar a arquitetura e implementação da estrutura computacional utilizada para desenvolvimento do modelo proposto de Aplicação para Alocação do CTOP e para a otimização da mesma aplicação utilizando Algoritmos Genéticos.

6.1 Definições e Detalhamento do Sistema

Faz-se necessária a descrição de algumas definições da aplicação desenvolvida com base no modelo proposto para resolução do problema.

Pela disponibilidade, versatilidade e abrangência, foram escolhidas tecnologias e linguagens de programação de característica *open-source* para o desenvolvimento da aplicação. Foi utilizada a linguagem de programação *Java* para desenvolvimento e implementação do modelo. Para armazenamento e gerenciamento das informações foi utilizado o banco de dados *My Structured Query Language* (MySQL).

A entrada de ambos os modelos desenvolvidos foram os voos extraídos da base de dados da ANAC nas datas de 02 e 09 de Março de 2018.

6.2 Aplicação de Alocação do CTOP

A Aplicação de Alocação do CTOP tem como base o algoritmo do CTOP, conforme descrito no modelo de Aplicação de Alocação do CTOP, definido no Capítulo 5. De acordo com a Figura 6.1, a arquitetura da aplicação tem como fluxo de informações de execução da aplicação os seguintes passos:

1. Carga de Voos: nesta etapa serão capturados alguns voos disponíveis em um banco de dados. Os voos serão disponibilizados de acordo com um cenário definido, ou seja,

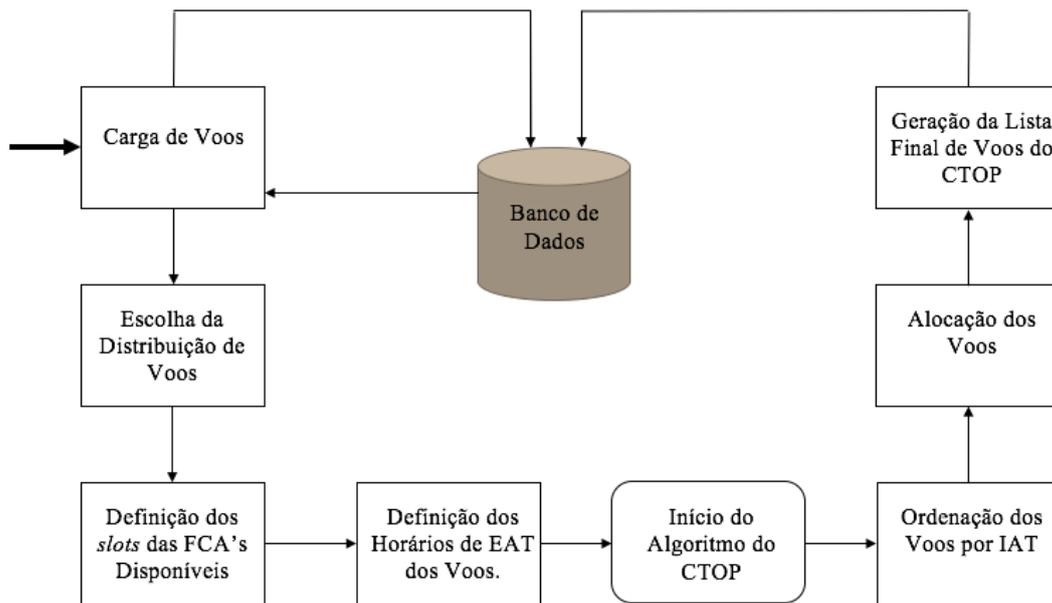


Figura 6.1: Arquitetura da Aplicação do CTOP.

seguindo uma data, horário, FCA, companhia aérea e outras informações pertinentes para simulação do CTOP e alocação de *slots*;

2. Escolha da Distribuição de Voos: neste passo é definido uma distribuição de voos para cada companhia aérea. Inicialmente o modelo proposto de aplicação poderá trabalhar com (3) três distribuições de voos:

- 50% dos voos para a Companhia Aérea A e 50% dos voos para a Companhia Aérea B;
- 67% dos voos para a Companhia Aérea A e 33% dos voos para a Companhia Aérea B;
- 75% dos voos para a Companhia Aérea A e 25% dos voos para a Companhia Aérea B;

A Figura 6.2 apresenta esta etapa de escolha de Distribuição de Voos e a etapa anterior de Carga dos Voos.

3. Definição dos *slots* das FCA's Disponíveis: é definido um conjunto de *slots* disponíveis onde os voos capturados no CTOP poderão ser alocados nas FCA's. Com base em um intervalo de tempo é definida uma proporção de *slots* por intervalo de tempo em cada FCA. A captura de tela desta etapa poder ser verificada na Figura 6.3;

4. Definição dos Horários de EAT dos Voos: neste passo são gerados os horários de entrada dos voos nas FCA's, definidos como *Earliest Arrival Time* (EAT). Esses

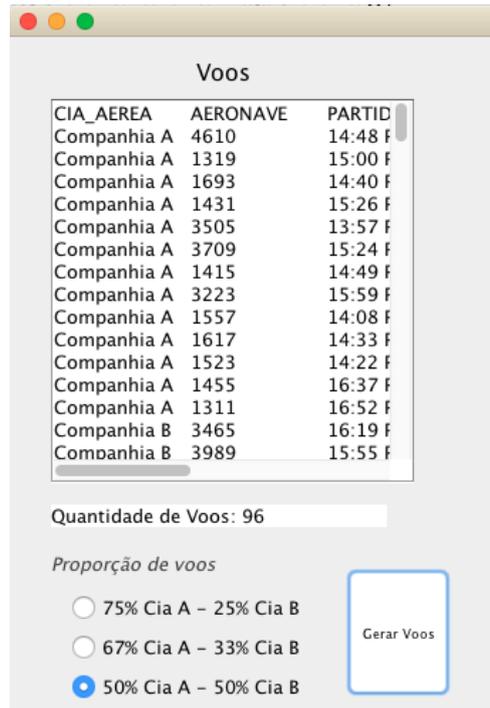


Figura 6.2: Captura de tela da carga dos voos e escolha da distribuição de voos.

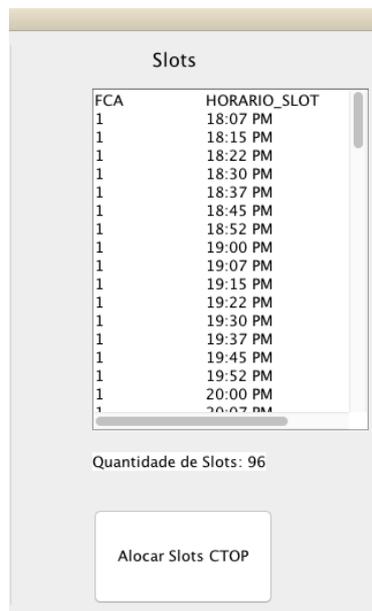


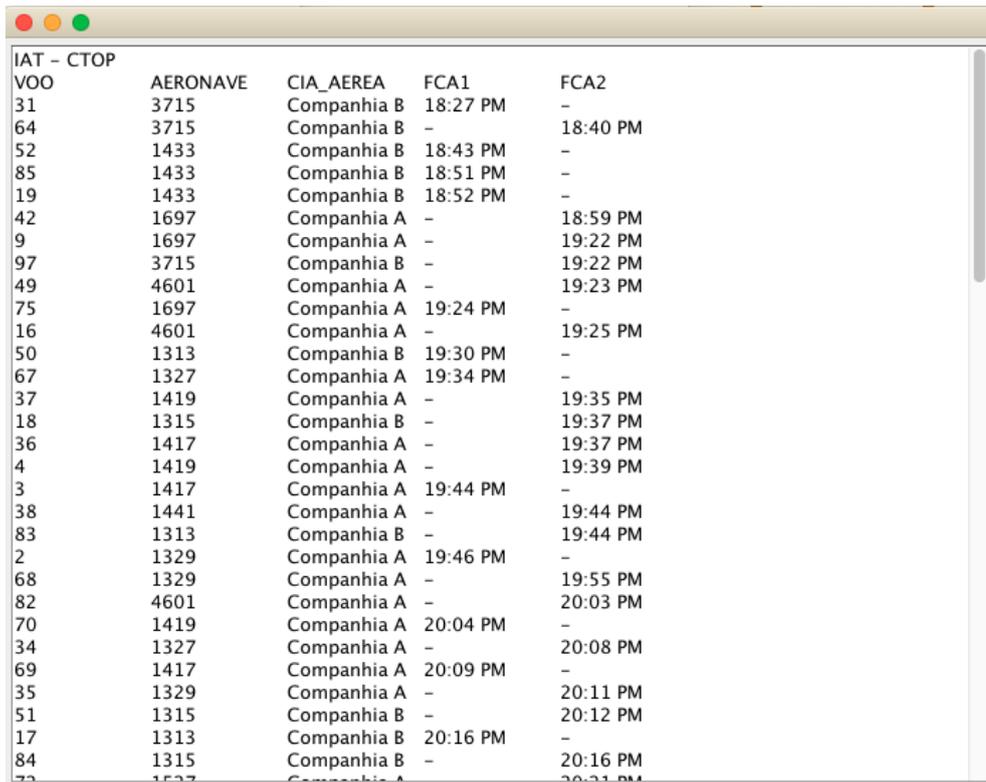
Figura 6.3: Captura de tela da definição dos *slots*

horários são gerados aleatoriamente com base no horário de chegada dos voos nos aeroportos de destino;

5. Início da Aplicação do CTOP: nesta etapa o algoritmo do CTOP é iniciado. Na Figura 6.3 é apresentada a captura de tela desta etapa, onde o Algoritmo do CTOP

pode ser iniciado;

6. Ordenação dos Voos por IAT: neste passo os voos são ordenados pelo horário de *Earliest Arrival Time* (EAT) gerando a lista de *Initial Arrival Time* (IAT). Essa lista é necessária para alocação dos voos nos *slots*. A lista com os voos pode ser verificada na Figura 6.4;



VOO	AERONAVE	CIA_AEREA	FCA1	FCA2
31	3715	Companhia B	18:27 PM	-
64	3715	Companhia B	-	18:40 PM
52	1433	Companhia B	18:43 PM	-
85	1433	Companhia B	18:51 PM	-
19	1433	Companhia B	18:52 PM	-
42	1697	Companhia A	-	18:59 PM
9	1697	Companhia A	-	19:22 PM
97	3715	Companhia B	-	19:22 PM
49	4601	Companhia A	-	19:23 PM
75	1697	Companhia A	19:24 PM	-
16	4601	Companhia A	-	19:25 PM
50	1313	Companhia B	19:30 PM	-
67	1327	Companhia A	19:34 PM	-
37	1419	Companhia A	-	19:35 PM
18	1315	Companhia B	-	19:37 PM
36	1417	Companhia A	-	19:37 PM
4	1419	Companhia A	-	19:39 PM
3	1417	Companhia A	19:44 PM	-
38	1441	Companhia A	-	19:44 PM
83	1313	Companhia B	-	19:44 PM
2	1329	Companhia A	19:46 PM	-
68	1329	Companhia A	-	19:55 PM
82	4601	Companhia A	-	20:03 PM
70	1419	Companhia A	20:04 PM	-
34	1327	Companhia A	-	20:08 PM
69	1417	Companhia A	20:09 PM	-
35	1329	Companhia A	-	20:11 PM
51	1315	Companhia B	-	20:12 PM
17	1313	Companhia B	20:16 PM	-
84	1315	Companhia B	-	20:16 PM
73	1537	Companhia A	-	20:21 PM

Figura 6.4: Captura de tela com a lista de voos ordenados por IAT.

7. Alocação dos Voos: nesta etapa os voos são alocados de acordo com a lista de *Initial Arrival Time* (IAT) e a disponibilidade dos *slots*;
8. Geração da Lista Final de Voos do CTOP: após a alocação dos voos nos *slots* é gerada a lista dos voos do CTOP e armazenada no banco de dados, indicando a FCA e os horários de entrada do voo na mesma. A lista final dos voos alocados pode ser verificada na Figura 6.5.

6.3 Aplicação de Otimização de *slots* com AG

A Aplicação de Otimização de *slots* com AG tem como base a Aplicação de Alocação do CTOP juntamente com o Algoritmo Genético proposto para busca de um conjunto ótimo

VOO	AERONAVE	CIA_AEREA	ENT_FCA1	ENT_FCA2	FCA	HORARIO_SLOT	ATRASO
31	3715	Companhia B	18:27 PM	18:34 PM	1	18:30 PM	00:03:00
64	3715	Companhia B	18:46 PM	18:40 PM	2	18:45 PM	00:05:00
52	1433	Companhia B	18:43 PM	18:49 PM	1	18:45 PM	00:02:00
85	1433	Companhia B	18:51 PM	18:54 PM	1	18:52 PM	00:01:00
42	1697	Companhia A	19:02 PM	18:59 PM	2	19:00 PM	00:01:00
19	1433	Companhia B	18:52 PM	19:01 PM	1	19:00 PM	00:08:00
9	1697	Companhia A	19:28 PM	19:22 PM	2	19:22 PM	00:00:00
75	1697	Companhia A	19:24 PM	19:29 PM	1	19:30 PM	00:06:00
97	3715	Companhia B	19:23 PM	19:22 PM	2	19:30 PM	00:08:00
50	1313	Companhia B	19:30 PM	19:31 PM	1	19:37 PM	00:07:00
49	4601	Companhia A	19:24 PM	19:23 PM	2	19:37 PM	00:14:00
16	4601	Companhia A	19:27 PM	19:25 PM	2	19:45 PM	00:20:00
67	1327	Companhia A	19:34 PM	19:35 PM	1	19:45 PM	00:11:00
3	1417	Companhia A	19:44 PM	19:48 PM	1	19:52 PM	00:08:00
37	1419	Companhia A	19:37 PM	19:35 PM	2	19:52 PM	00:17:00
2	1329	Companhia A	19:46 PM	19:50 PM	1	20:00 PM	00:14:00
18	1315	Companhia B	19:40 PM	19:37 PM	2	20:00 PM	00:23:00
36	1417	Companhia A	19:43 PM	19:37 PM	2	20:07 PM	00:30:00
70	1419	Companhia A	20:04 PM	20:05 PM	1	20:07 PM	00:03:00
68	1329	Companhia A	19:56 PM	19:55 PM	2	20:15 PM	00:20:00
69	1417	Companhia A	20:09 PM	20:14 PM	1	20:15 PM	00:06:00
17	1313	Companhia B	20:16 PM	20:24 PM	1	20:22 PM	00:06:00
82	4601	Companhia A	20:04 PM	20:03 PM	2	20:22 PM	00:19:00
1	1327	Companhia A	20:28 PM	20:33 PM	1	20:30 PM	00:02:00
34	1327	Companhia A	20:10 PM	20:08 PM	2	20:30 PM	00:22:00
86	1457	Companhia B	20:33 PM	20:36 PM	1	20:37 PM	00:04:00
35	1329	Companhia A	20:13 PM	20:11 PM	2	20:37 PM	00:26:00
98	3717	Companhia B	20:42 PM	20:43 PM	1	20:45 PM	00:03:00
84	1315	Companhia B	20:17 PM	20:16 PM	2	20:45 PM	00:29:00
40	1581	Companhia A	20:46 PM	20:50 PM	1	20:52 PM	00:06:00
25	3040	Companhia B	20:34 PM	20:27 PM	2	20:52 PM	00:25:00
53	1457	Companhia B	20:47 PM	20:55 PM	1	21:00 PM	00:13:00
39	1527	Companhia A	20:35 PM	20:32 PM	2	21:00 PM	00:28:00
5	1441	Companhia A	20:45 PM	20:44 PM	2	21:07 PM	00:23:00

Figura 6.5: Captura de tela com a lista final de voos alocados.

de *slots* definido no Capítulo 5. Por ter como base a Aplicação de Alocação do CTOP esta arquitetura tem como passos iniciais algumas etapas semelhantes à aplicação base.

Conforme pode ser verificado na Figura 6.6 são seguidas as mesmas etapas iniciais, desde a Carga de Voos até a Alocação dos Voos nos *slots*. Após a Alocação de Voos é iniciado o Algoritmo Genético e então é dada continuidade nos passos definidos nesta arquitetura, seguindo o seguinte fluxo de informações de execução:

1. Início do Algoritmo Genético: nesta etapa é iniciado o AG, tendo como base o Algoritmo Genético definido no modelo do Capítulo 5 e a população inicial é o conjunto de *slots* com voos alocados resultantes da etapa anterior, Alocação dos Voos. A quantidade de gerações do algoritmo é definida na entrada da aplicação. A captura de tela desta etapa pode ser verificada na Figura 6.7;
2. Obtenção do Conjunto Ótimo de *slots*: o AG executado na etapa anterior tem como resultado um conjunto ótimo de *slots*, sendo então disponibilizado para a aplicação. A Figura 6.8 apresenta um resumo da execução do AG, com informações de todas

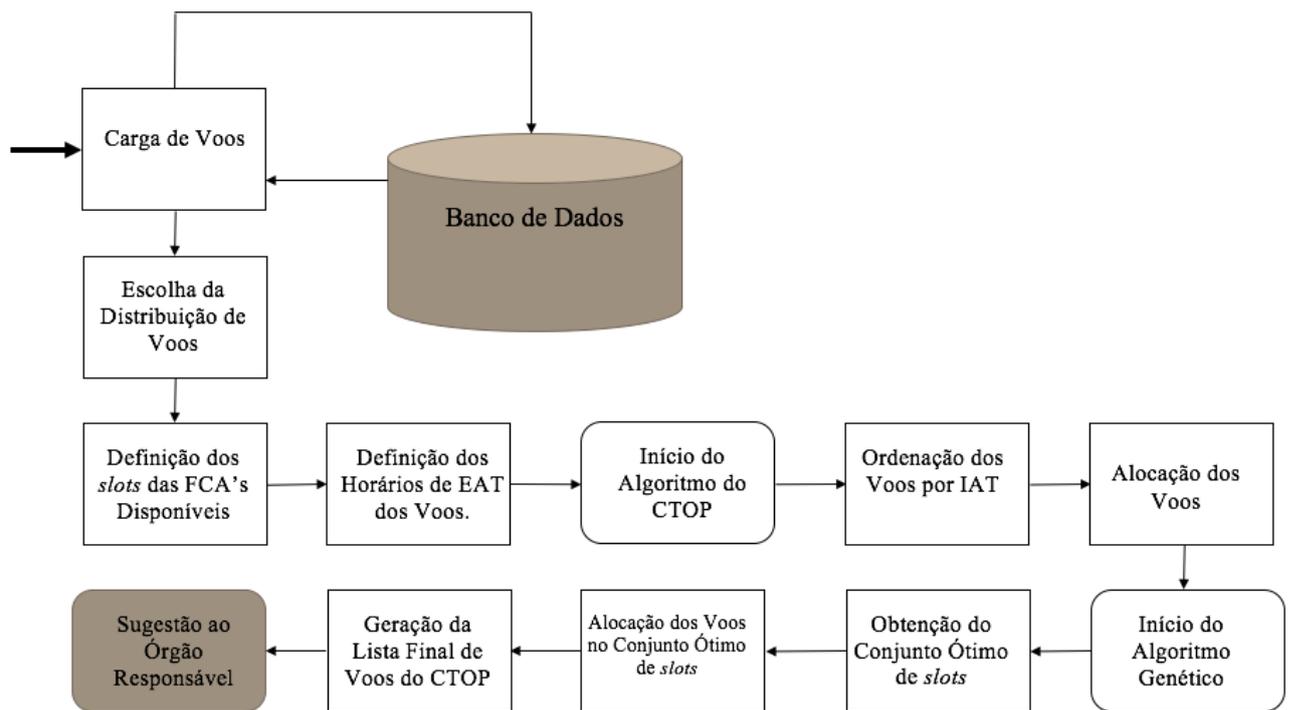


Figura 6.6: Arquitetura da Aplicação de Otimização de *slots* com AG.

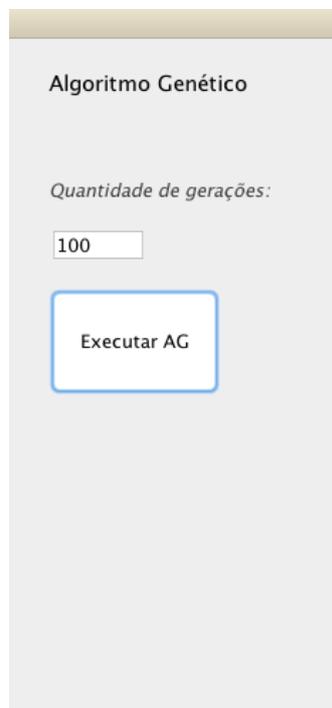


Figura 6.7: Captura de tela da Tela utilizada para definir as gerações e iniciar o AG.

as gerações. A Figura 6.9 apresenta a captura de tela do conjunto ótimo de *slots* obtido com a execução do AG;

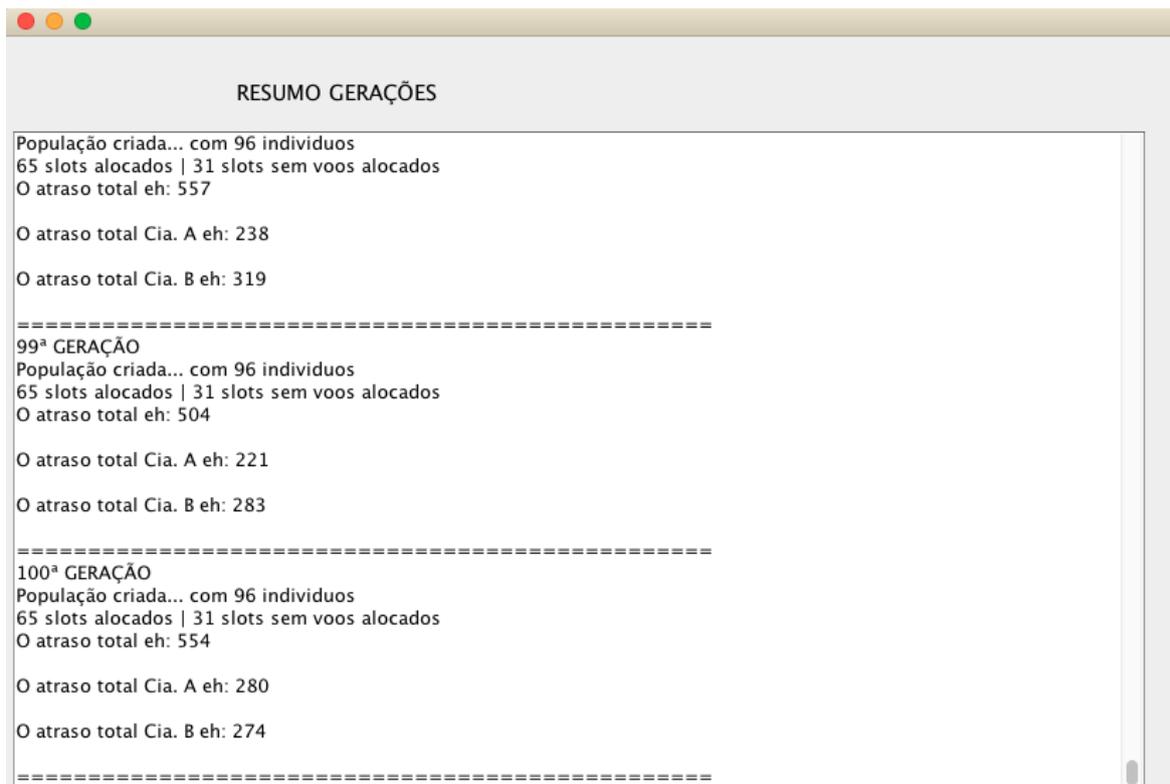


Figura 6.8: Captura de tela com o resumo das gerações durante a execução do AG.

3. Alocação dos Voos no Conjunto Ótimo de *slots*: após a obtenção do conjunto ótimo de *slots* os voos iniciais são alocados neste conjunto;
4. Geração da Lista Final de Voos do CTOP: com os voos alocados no conjunto ótimo de *slots* é gerada uma lista de final de voos do CTOP. A Figura 6.5 apresenta a captura de tela da lista final gerada;
5. Sugestão ao Órgão Responsável: é sugerida uma lista final de voos do CTOP que possibilite um menor atraso para as companhias aéreas e órgãos responsáveis.

6.4 Banco de Dados

O Modelo Entidade Relacionamento (MER) do banco de dados utilizado para armazenar os dados utilizados na Aplicação de Alocação do CTOP está representado na Figura 6.10. As informações pertinentes aos voos e todos os outros dados necessários para execução da aplicação tanto como a análise após execução e estudo de caso estão disponíveis no banco de dados apresentado.

Na Figura 6.11 é apresentado o MER do banco de dados da Otimização da Aplicação do CTOP. Neste novo modelo de banco de dados é inserida a tabela *historico_slots* que

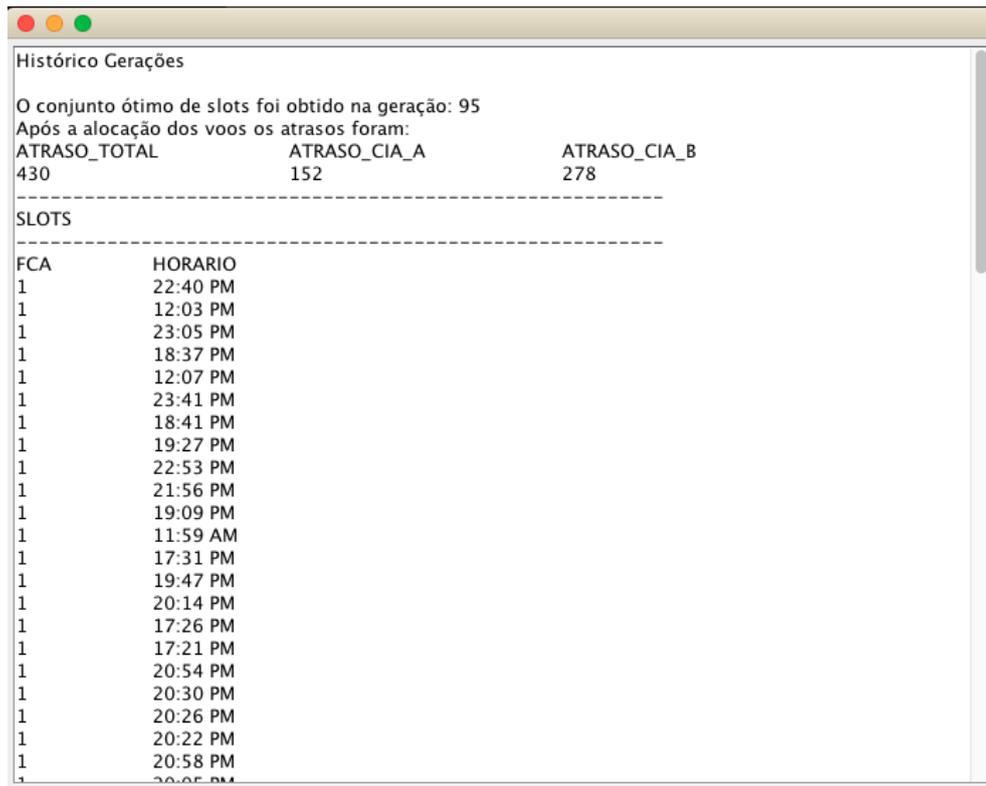


Figura 6.9: Captura de tela com o conjunto ótimo de *slots* obtido pelo AG.

armazena todo o histórico das gerações de conjunto de *slots* durante a execução do AG na otimização proposta.

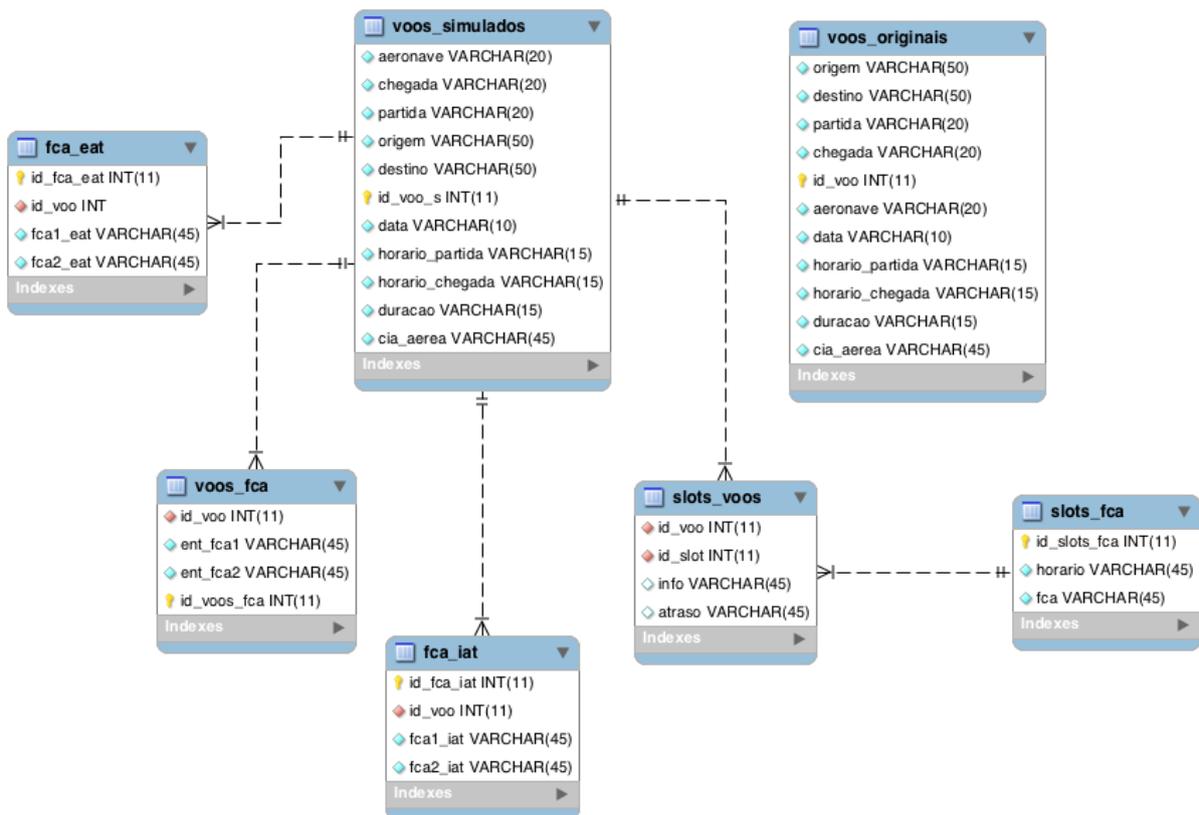


Figura 6.10: Modelo Entidade Relacionamento do Algoritmo do CTOP.

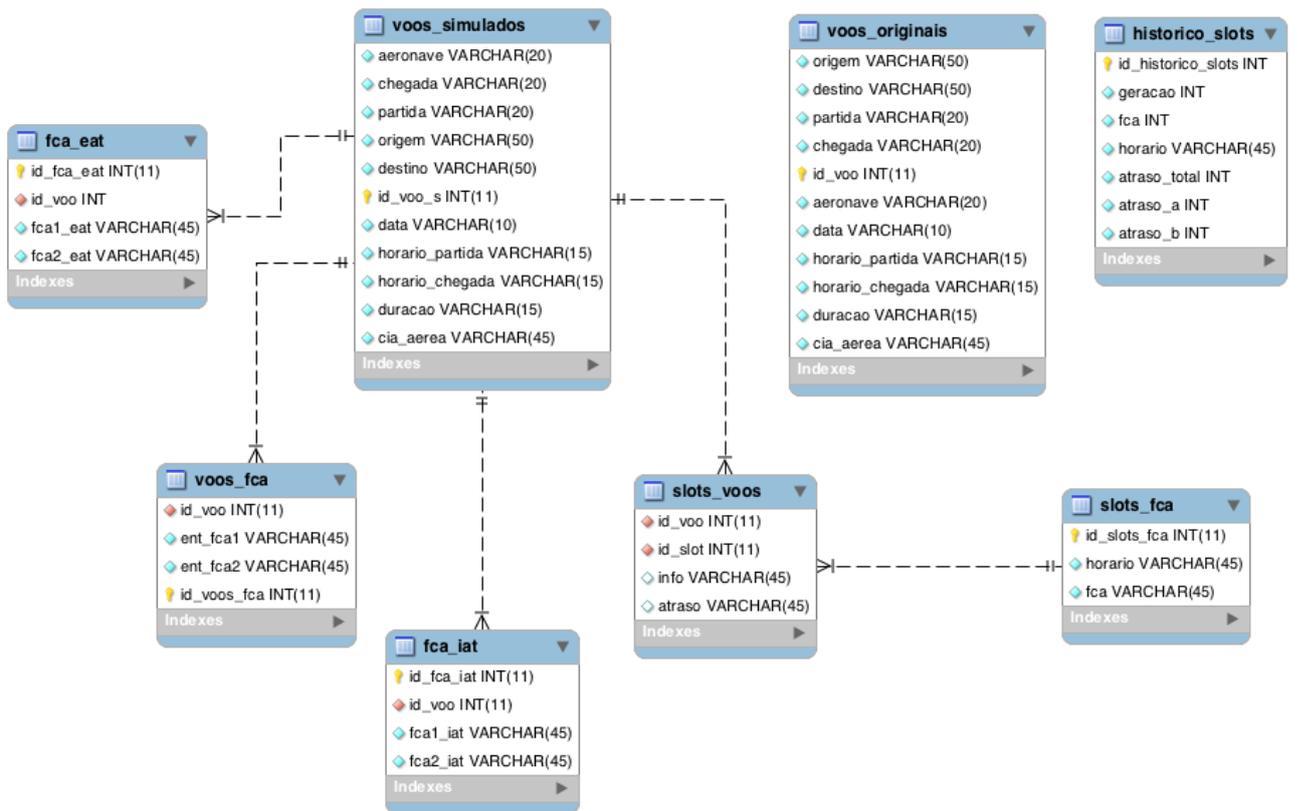


Figura 6.11: Modelo Entidade Relacionamento do Algoritmo do CTOP com a otimização de AG.

Capítulo 7

Estudo de Caso

Neste Capítulo será apresentado o estudo de caso utilizado para testar a proposta de solução apresentada e implementada nos Capítulos 5 e 6. A seção 7.1 irá especificar o ambiente computacional utilizado para testar o estudo de caso. Na seção 7.2 são descritos os cenários de teste que serão utilizados. A seção 7.3 apresenta a execução do estudo de caso. Na seção 7.4 são apresentados os resultados obtidos.

7.1 Ambiente Computacional de Testes

O ambiente computacional utilizado para teste da solução proposta é descrito da seguinte forma:

- **Hardware** - MacBook Pro (Late 2011) - 2,4 GHz Intel Core i5, 8GB RAM 1333 MHz DDR3.
- **Sistema Operacional** - macOS High Sierra 10.13.1
- **Compilador** - JDK 1.8
- **IDE** - Eclipse IDE for Java Developers Version: Oxygen.2 Release (4.7.2)
- **SGBD** - MySQL Workbench 6.3.10 (64 Bits) Community

7.2 Cenários

Será elaborado um planejamento dos cenários estudo de caso para validação e comparação dos modelos considerando voos do espaço aéreo brasileiro.

Após definição e planejamento dos cenários então serão feitos os testes para a solução proposta. Primeiramente será executada a aplicação de alocação de *slots* do CTOP e após essa etapa será feita a otimização da aplicação com a proposta de aplicação em AG.

Serão utilizados 6 cenários de teste, cada um com 3(três) distribuições distintas entre os voos das companhias aéreas, sendo que cada distribuição será simulada em horário de pico e em horário normal dos aeroportos. A análise em horários com alta demanda de voos poderá auxiliar a validação da proposta de diminuição de atraso dos voos capturados no CTOP. Os cenários poderão ser divididos inicialmente nos seguintes casos:

- Cenário 1 - *Companhia Aérea A* 50% dos Voos - *Companhia Aérea B* 50% dos Voos. Neste cenário as duas companhias aéreas tem a mesma distribuição de voos;
- Cenário 2 - *Companhia Aérea A* 63% dos Voos - *Companhia Aérea B* 37% dos Voos. Nesta distribuição a *Companhia Aérea A* terá uma maior quantidade de voos em comparação com a *Companhia Aérea B*;
- Cenário 3 - *Companhia Aérea A* 75% dos Voos - *Companhia Aérea B* 25% dos Voos. Seguindo o cenário anterior, neste caso a *Companhia Aérea A* terá novamente uma maior distribuição de voos em comparação com a *Companhia Aérea B*;

7.2.1 Parâmetros Preliminares para Execução da Aplicação do CTOP

A execução da aplicação inicial de alocação de *slots* do CTOP requer inicialmente a definição de alguns parâmetros. Primeiramente para execução do modelo geral da aplicação nos cenários definidos iremos trabalhar com duas FCAs, a primeira nomeada de FCA 1 e a segunda de FCA 2; duas companhias aéreas, nomeadas de Companhia A e Companhia B; e serão utilizados voos de 9 aeroportos brasileiros, conforme a Figura 7.1. Os aeroportos utilizados são exemplificados a seguir:

- Aeroporto Internacional de Fortaleza - Pinto Martins (FOR);
- Aeroporto Internacional de Recife - Gilberto Freyre (REC);
- Aeroporto de Teresina - Senador Petrônio Portella (THE);
- Aeroporto Internacional de Salvador - Luiz Eduardo Magalhães (SSA);
- Aeroporto Internacional de Brasília - Presidente Juscelino Kubitschek (BSB) ;
- Aeroporto Internacional Belo Horizonte-Confins - Tancredo Neves (CNF);
- Aeroporto Internacional de Goiânia - Santa Genoveva (GYN);
- Aeroporto de Congonhas - Deputado Freitas Nobre (CGH);
- Aeroporto Internacional de Guarulhos - Governador André Franco Montoro (GRU).

Conforme apresentadas na Figura 7.1, as FCAs estão geograficamente delimitadas à aproximadamente 300km do Aeroporto de Congonhas - Deputado Freitas Nobre (CGH) e do Aeroporto Internacional de Guarulhos - Governador André Franco Montoro (GRU). Essa distância possibilita que o tempo de entrada das aeronaves na FCA corresponda à um intervalo de 30 a 45 minutos antes do horário de chegada nos aeroportos CGH e GRU.

Com as FCAs definidas próximas aos aeroportos CGH e GRU, então foram definidos como partida dos voos os aeroportos brasileiros geograficamente ao norte desses aeroportos, dentre os 9 utilizados.

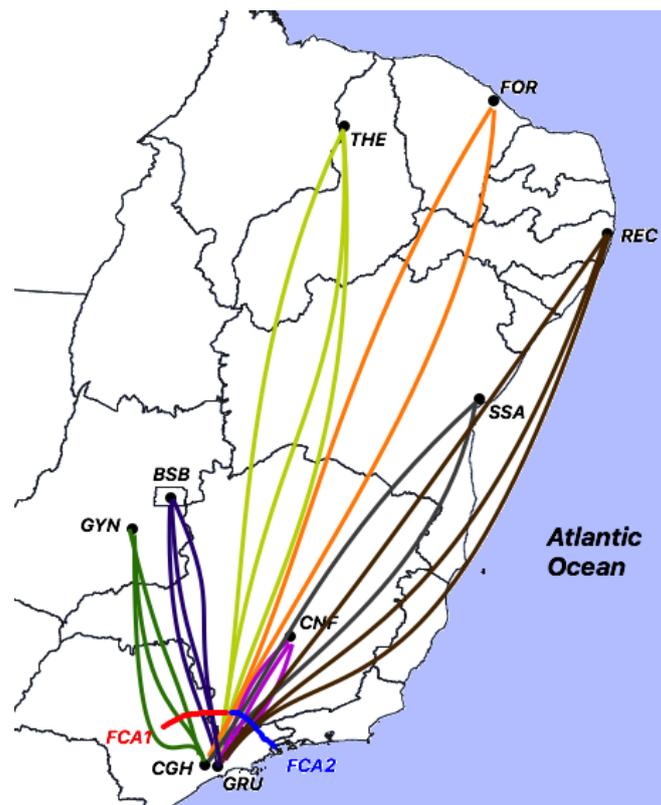


Figura 7.1: Voos partindo de 9 aeroportos brasileiros e duas FCAs.

Período do Cenário

De acordo com a Figura 7.2 o período com uma maior quantidade de voos ocorre desde o fim da tarde até o final do dia. Com base nessa premissa foi escolhida a faixa de horário de 16h até as 23h59 para os voos utilizados neste estudo de caso.

Conforme já definido anteriormente, dentre as proporções de voos por companhia aérea serão definidos dois subcenários, horário de normal e horário de pico. Para o horário normal será escolhida a faixa de horário de 20h até as 23h59 e para o horário de pico serão os voos entre 16h e 19h59. Após análise da quantidade de voos diários no espaço aéreo

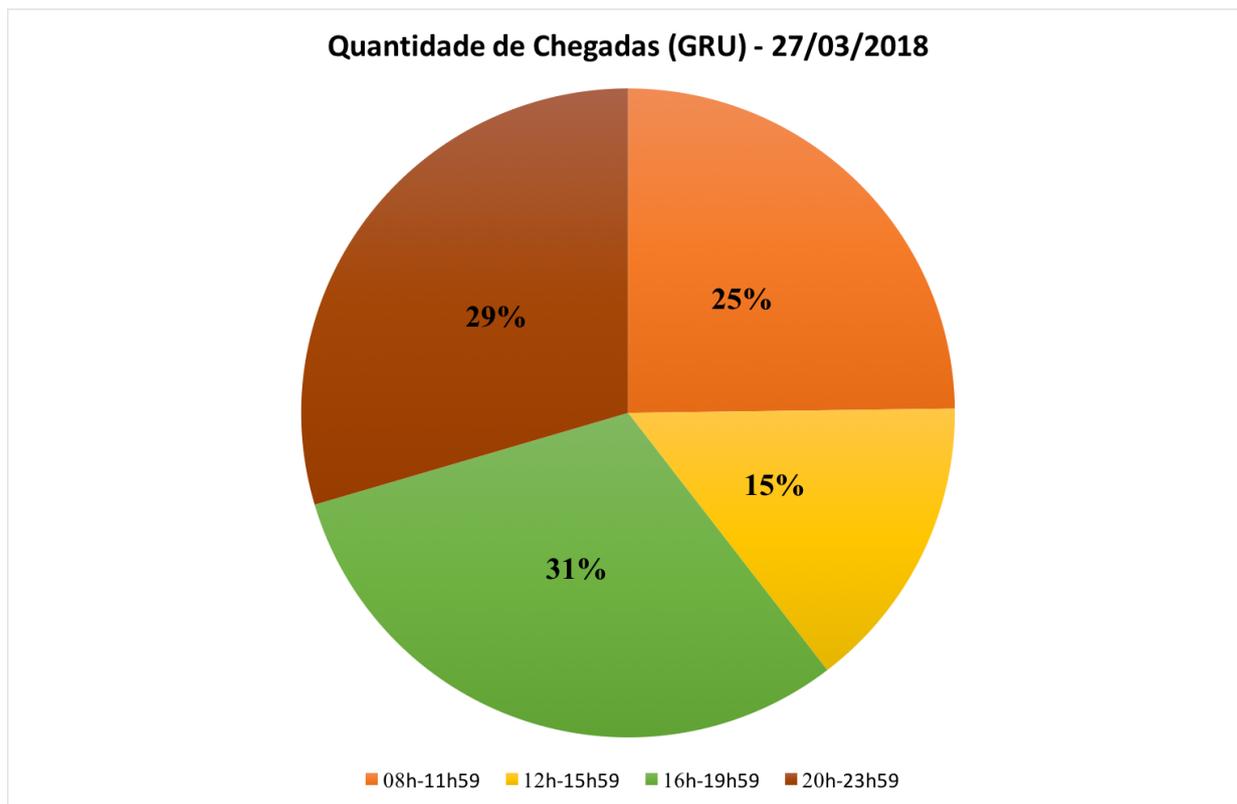


Figura 7.2: Proporção de chegadas de voos por faixa de horário no Aeroporto Internacional de Guarulhos - Governador André Franco Montoro (GRU).

FCA	Capacidade (aeronave)	Faixa de tempo (minutos)
FCA 1	2	15
FCA 2	2	15

Tabela 7.1: Capacidade de cada FCA por faixa de tempo.

brasileiro, foi definido que no ambiente de simulação a quantidade de voos no horário de pico pode ser até 1,5 vezes maior que no horário normal.

Pela premissa da FCA ser a restrição da quantidade de voos que irá sobrevoar por determinada região e durante determinada faixa de horário, então foi definido que a capacidade para cada FCA será duas aeronaves em cada período de 15 minutos, conforme a Tabela 7.1.

Definição dos *slots* das FCAs

Neste estudo de caso foram simulados os *slots* das FCAs utilizadas de forma que obedecesse o limite de cada FCA por faixa de tempo, conforme definido anteriormente. Dessa forma temos que a cada hora, cada FCA tenha 8 *slots*, pois a capacidade definida para cada FCA é 2 aeronaves a cada 15 minutos.

A definição dos *slots* também obedece a recomendação de segurança que define um distanciamento aproximado de 2 minutos para aeronaves de médio e grande porte. Se o horário de determinado *slot* for 16:07 então o horário do próximo *slot* gerado poderá ser somente 16:05 ou 16:09.

Pela faixa de horário de determinado subcenário ser de aproximadamente 04h (16h às 19h59, no horário de pico e 20h às 23h50 no horário normal), teremos um subcenário com 64 *slots*, pois serão 32 *slots* para cada FCA.

Definição da Quantidade de Voos e Proporções por Companhia Aérea

Para efeito de simulação de um cenário no espaço aéreo brasileiro onde exista uma maior concorrência de *slots* por parte dos voos e companhias aéreas e verificação da possibilidade da aplicação do CTOP de acordo com as premissas desta iniciativa, os dados com informações dos voos utilizados serão simulados. Essa ação permitirá um cenário com uma quantidade maior de voos em comparação com a realidade brasileira e então poderá gerar um cenário de congestionamento e restrição, onde a quantidade de voos é maior que a quantidade de *slots* disponíveis das FCAs.

Seguindo essa premissa, inicialmente foram gerados 96 voos para o subcenário de horário normal e 135 voos para o horário de pico. Os voos simulados para o subcenário de horário normal foram gerados com base em informações de voos reais do espaço aéreo brasileiro na data de 02 de Março de 2018. Para o subcenário de horário de pico os voos foram gerados com base em informações de voos reais do mesmo espaço aéreo, porém na data de 09 de Março de 2018.

Essa distinção de datas para cada subcenário tentará simular de forma mais realística a demanda CTOP, pois as restrições do programa poderão ocorrer de acordo com variadas adversidades que possam ocorrer no espaço aéreo.

Ao iniciar a execução da aplicação é escolhida determinada distribuição para os voos das duas companhias aéreas. Ao total serão utilizados três cenários de distribuição de voos e dois subcenários de congestionamento no espaço aéreo sendo estes:

- *50% Companhia aérea A - 50% Companhia aérea B*
 - Horário Normal - 96 voos no total, 48 para cada companhia aérea;
 - Horário de Pico - 135 voos no total, 67 para a companhia aérea A e 68 e para a companhia aérea B.

- *63% Companhia aérea A - 37% Companhia aérea B*
 - Horário Normal - 96 voos no total, 60 para a companhia aérea A e 36 para companhia aérea B;

- Horário de Pico - 135 voos no total, 85 para a companhia aérea A e 50 voos para companhia aérea B.
- 75% Companhia aérea A - 25% Companhia aérea B
 - Horário Normal - 96 voos no total, 72 para a companhia aérea A e 24 para companhia aérea B;
 - Horário de Pico - 135 voos no total, 101 voos para a companhia aérea A e 34 para a companhia aérea B.

Definição dos Horários de *Earliest Arrival Time* (EAT)

Para definição dos horários de entrada dos voos em cada FCA (horário de EAT) foi tomado como base a distância de tempo aproximada das FCAs (30 a 45 minutos) para os dois aeroportos de destino utilizado no estudo de caso (GRU e CGH). Desta forma os horários de EAT foram definidos subtraindo um quantidade aleatória entre 30 e 45 do horário de chegada dos voos nos aeroportos de destino.

7.2.2 Parâmetros Preliminares para Execução da Aplicação do CTOP com Otimização em AG

Conforme descrito no Capítulo 5 a Otimização utilizando AG tem como entrada um conjunto de *slots*, sendo então definida na Aplicação a quantidade de gerações que o AG irá executar para obter um conjunto ótimo de *slots*.

As definições pertinentes às taxas de mutação e *crossover* já foram definidas na modelagem da Aplicação, de acordo com o Capítulo 5.

Em cada geração será executada a alocação de voos nos *slots* com aquela população corrente de *slots*, realizando a avaliação e seleção dos melhores *slots* para então ser gerada uma nova geração. No decorrer da execução da otimização o algoritmo irá convergir para um conjunto ótimo de *slots* possibilitando a diminuição dos atrasos dos voos em comparação com a alocação inicial do CTOP.

Após uma série de testes com a mesma massa de dados dos voos utilizados neste estudo de caso, foi observado que a convergência para um melhor conjunto de *slots* é obtido em média na geração 200. Desta forma, foi escolhida essa quantidade de gerações como entrada da Aplicação da abordagem em AG.

Com essa quantidade de gerações indicada no início da Aplicação, o algoritmo será executado até atingir a quantidade de gerações definidas, guardando em um histórico todas as populações criadas e avaliadas. Ao fim da execução, os conjuntos de *slots* de

todas as populações serão verificados e então será retornado o melhor conjunto de *slots*, conforme objetivo da otimização.

7.3 Execução

Para validar cada cenário e subcenário do estudo de caso execução da Aplicação irá seguir os passos já descritos no Capítulo 5 e Capítulo 6.

Em cada cenário a Aplicação foi executada pelo menos 100 vezes para então identificar as gerações de convergência, taxas de mutação e *crossover* que possibilitam um melhor resultado final. As sucessivas execuções da Aplicação permitiu a identificação de inconsistências na implementação para correção, e também a detecção da sensibilidade do Aplicação para variados parâmetros iniciais.

Foi identificada heurísticamente a probabilidade de mutação $P_M = 0.2$ e probabilidade de cruzamento $P_C = 0.6$, onde esses valores se mostraram mais satisfatórios para obtenção do conjunto ótimo de *slots* após a série de testes e execuções.

Seguindo a definição do elitismo durante as gerações, também foi obtida heurísticamente a taxa de elitismo. Dessa forma, foi definido que 70% dos indivíduos com melhor aptidão na população P irão compor a próxima geração e os operadores genéticos serão aplicados nos 30% restantes dos indivíduos de P.

As definições de aeroportos de partida e chegada, companhias aéreas e posição geográfica das FCAs se mantiveram para todos os cenários e subcenários.

Durante a execução de cada cenário e subcenário há uma diferenciação dos voos, proporção de voos por companhia aérea, horários de *slots* e horários de EAT. Essa diferenciação ocorre, pois em cada execução da Aplicação há uma nova definição dos valores dessas informações.

7.3.1 Validação da Aplicação do CTOP com Otimização em AG

Após todas as execuções de cada cenário e subcenário, uma demanda CTOP aleatória foi capturada conforme descrito a seguir.

Foram utilizados 135 voos com destino aos aeroportos GRU e CGH. Esta demanda utilizou voos de duas companhias aéreas com chegada entre 16h e 20h, caracterizando horário de pico descrito no estudo de caso.

A tabela 7.2 apresenta 13 voos da *Companhia Aérea A* e 13 voos da *Companhia Aérea B* utilizados neste estudo de caso. Os demais voos utilizados podem ser verificados no Apêndice A.

Tabela 7.2: Voos capturados no CTOP com chegada entre 16h e 20.

VOO	CIA_AEREA	PARTIDA	CHEGADA	ORIGEM	DESTINO
1	Companhia A	15:22 PM	16:04 PM	CNF	GRU
2	Companhia A	15:22 PM	16:49 PM	CNF	GRU
3	Companhia A	14:21 PM	16:51 PM	SSA	GRU
4	Companhia A	15:07 PM	17:21 PM	GYN	CGH
5	Companhia A	14:11 PM	17:07 PM	REC	GRU
6	Companhia A	15:20 PM	17:09 PM	BSB	CGH
7	Companhia A	14:58 PM	17:22 PM	BSB	GRU
8	Companhia A	16:15 PM	17:49 PM	CNF	CGH
9	Companhia A	13:43 PM	17:17 PM	REC	CGH
10	Companhia A	13:52 PM	17:53 PM	REC	GRU
11	Companhia A	14:07 PM	17:36 PM	FOR	GRU
12	Companhia A	15:50 PM	18:16 PM	BSB	CGH
13	Companhia A	16:15 PM	17:33 PM	CNF	CGH
14	Companhia B	16:29 PM	18:02 PM	GYN	CGH
15	Companhia B	16:00 PM	18:06 PM	SSA	GRU
16	Companhia B	17:21 PM	18:41 PM	CNF	CGH
17	Companhia B	15:40 PM	18:52 PM	REC	GRU
18	Companhia B	16:39 PM	19:54 PM	SSA	GRU
19	Companhia B	18:23 PM	19:47 PM	CNF	CGH
20	Companhia B	17:47 PM	19:43 PM	BSB	CGH
21	Companhia B	15:45 PM	19:57 PM	FOR	GRU
22	Companhia B	16:48 PM	19:51 PM	REC	GRU
23	Companhia B	18:27 PM	19:41 PM	CNF	GRU
24	Companhia B	18:13 PM	19:39 PM	BSB	GRU
25	Companhia B	17:54 PM	20:01 PM	BSB	CGH
26	Companhia B	18:03 PM	19:33 PM	THE	CGH

Foram utilizadas duas FCAs com a mesma capacidade, conforme a Tabela 7.1. Os *slots* iniciais das FCAs definidos para alocação dos voos capturados do CTOP são descritos na Tabela 7.3.

Tabela 7.3: *Slots* disponíveis no início da execução da Aplicação.

Hora	Slots disponíveis	
	FCA 1	FCA 2
16:00	16:07 PM 16:15 PM, 16:22 PM, 16:30 PM, 16:37 PM, 16:45 PM, 16:52 PM, 17:00 PM	16:07 PM 16:15 PM, 16:22 PM, 16:30 PM, 16:37 PM, 16:45 PM, 16:52 PM, 17:00 PM
17:00	17:07 PM 17:15 PM, 17:22 PM, 17:30 PM, 17:37 PM, 17:45 PM, 17:52 PM, 18:00 PM	17:07 PM 17:15 PM, 17:22 PM, 17:30 PM, 17:37 PM, 17:45 PM, 17:52 PM, 18:00 PM
18:00	18:07 PM, 18:15 PM, 18:22 PM, 18:30 PM, 18:37 PM, 18:45 PM, 18:52 PM, 19:00 PM	18:07 PM, 18:15 PM, 18:22 PM, 18:30 PM, 18:37 PM, 18:45 PM, 18:52 PM, 19:00 PM
19:00	19:07 PM, 19:15 PM, 19:22 PM, 19:30 PM, 19:37 PM, 19:45 PM, 19:52 PM, 20:00 PM	19:07 PM, 19:15 PM, 19:22 PM, 19:30 PM, 19:37 PM, 19:45 PM, 19:52 PM, 20:00 PM

Conforme modelo, foram definidos os horários de EAT dos voos executando um sorteio de valores com base no horário de chegada dos mesmos. Esse sorteio foi executado de forma que foi subtraído um valor entre 30 e 45 minutos do horário de chegada de cada voo.

Após o sorteio, os voos são ordenados pelos horários de IAT, sendo este o menor valor entre os horários de EAT para cada FCA de cada voo. A Tabela 7.4 apresenta 20 voos do estudo de caso ordenados por IAT, juntamente com os horários de EAT para cada voo. A lista com os demais voos ordenados pode ser verificada no Apêndice B.

Tabela 7.4: Voos ordenados por IAT.

VOO	CIA_AEREA	ENT_FCA1	ENT_FCA2	IAT_FCA1	IAT_FCA2
28	Companhia A	15:09 PM	15:07 PM		15:07 PM
82	Companhia A	15:15 PM	15:17 PM	15:15 PM	
1	Companhia A	15:32 PM	15:24 PM		15:24 PM
56	Companhia A	15:33 PM	15:28 PM		15:28 PM
29	Companhia A	15:31 PM	15:35 PM	15:31 PM	

55	Companhia A	15:42 PM	15:36 PM		15:36 PM
83	Companhia A	15:41 PM	15:50 PM	15:41 PM	
81	Companhia B	16:03 PM	15:50 PM		15:50 PM
30	Companhia A	16:01 PM	15:53 PM		15:53 PM
109	Companhia A	15:55 PM	16:01 PM	15:55 PM	
113	Companhia A	15:56 PM	16:02 PM	15:56 PM	
57	Companhia A	16:06 PM	15:58 PM		15:58 PM
84	Companhia A	16:04 PM	15:58 PM		15:58 PM
88	Companhia A	16:07 PM	16:01 PM		16:01 PM
110	Companhia A	16:02 PM	16:06 PM	16:02 PM	
86	Companhia A	16:04 PM	16:09 PM	16:04 PM	
135	Companhia B	16:16 PM	16:04 PM		16:04 PM
31	Companhia A	16:10 PM	16:05 PM		16:05 PM
27	Companhia B	16:15 PM	16:06 PM		16:06 PM
3	Companhia A	16:18 PM	16:08 PM		16:08 PM

Na execução da Aplicação com Otimização utilizando AG a população e geração inicial é o conjunto de *slots* iniciais definidos na Tabela 7.3. Foi definida uma quantidade de 200 gerações para entrada da Aplicação com AG e após a execução foi obtido o melhor conjunto de *slots* que é exemplificado na Tabela 7.5. Este conjunto de *slots* foi obtido na geração de número 200.

Tabela 7.5: Melhor conjunto de *slots* disponíveis após a execução da Aplicação.

Hora	Slots disponíveis	
	FCA 1	FCA 2
12:00	12:06 PM,12:09 PM, 12:11 PM,12:21 PM, 12:45 PM,12:48 PM, 12:52 PM	12:01 PM,12:15 PM, 12:51 PM
13:00		13:28 PM,13:30 PM, 13:49 PM
14:00	14:00 PM,14:04 PM, 14:09 PM,14:20 PM	14:03 PM,14:15 PM
15:00	15:32 PM,15:41 PM, 15:55 PM,15:57 PM	15:08 PM,15:18 PM, 15:24 PM,15:28 PM, 15:33 PM,15:36 PM, 15:50 PM,15:54 PM, 15:56 PM,15:58 PM
16:00	16:03 PM,16:06 PM, 16:09 PM,16:19 PM, 16:21 PM,16:24 PM, 16:27 PM,16:32 PM, 16:34 PM,16:36 PM, 16:38 PM,16:42 PM, 16:44 PM,16:46 PM, 16:48 PM,16:50 PM	16:00 PM,16:02 PM, 16:04 PM,16:06 PM, 16:08 PM,16:10 PM, 16:14 PM,16:16 PM, 16:20 PM,16:28 PM, 16:36 PM
18:00		18:37 PM,18:39 PM
23:00		23:35 PM

Seguindo a execução da Aplicação de Alocação do CTOP esse melhor conjunto de *slots* será utilizado para alocar os voos capturados exemplificados na Tabela 7.2 e então obtemos a lista final de alocação do CTOP descrita na Tabela 7.6.

Tabela 7.6: Voos alocados no melhor conjunto de *slots*.

	VOO	CIA_AEREA	ENT_FCA1	ENT_FCA2	FCA	SLOT	ATRASSO
1	28	Companhia A	15:09 PM	15:07 PM	1	15:08 PM	00:01:00
2	82	Companhia A	15:15 PM	15:17 PM	1	15:15 PM	00:00:00
3	1	Companhia A	15:32 PM	15:24 PM	1	15:24 PM	00:00:00

4	56	Companhia A	15:33 PM	15:28 PM	1	15:28 PM	00:00:00
5	29	Companhia A	15:31 PM	15:35 PM	1	15:32 PM	00:01:00
6	55	Companhia A	15:42 PM	15:36 PM	1	15:36 PM	00:00:00
7	83	Companhia A	15:41 PM	15:50 PM	1	15:41 PM	00:00:00
8	81	Companhia B	16:03 PM	15:50 PM	1	15:50 PM	00:00:00
9	30	Companhia A	16:01 PM	15:53 PM	1	15:54 PM	00:01:00
10	109	Companhia A	15:55 PM	16:01 PM	1	15:55 PM	00:00:00
11	113	Companhia A	15:56 PM	16:02 PM	1	15:57 PM	00:01:00
12	57	Companhia A	16:06 PM	15:58 PM	1	15:58 PM	00:00:00
13	84	Companhia A	16:04 PM	15:58 PM	1	16:00 PM	00:02:00
14	88	Companhia A	16:07 PM	16:01 PM	1	16:02 PM	00:01:00
15	110	Companhia A	16:02 PM	16:06 PM	1	16:03 PM	00:01:00
16	135	Companhia B	16:16 PM	16:04 PM	1	16:04 PM	00:00:00
17	31	Companhia A	16:10 PM	16:05 PM	1	16:06 PM	00:01:00
18	86	Companhia A	16:04 PM	16:09 PM	1	16:06 PM	00:02:00
19	27	Companhia B	16:15 PM	16:06 PM	1	16:08 PM	00:02:00
20	111	Companhia A	16:09 PM	16:21 PM	1	16:09 PM	00:00:00
21	3	Companhia A	16:18 PM	16:08 PM	1	16:10 PM	00:02:00
22	58	Companhia A	16:12 PM	16:08 PM	1	16:14 PM	00:06:00
23	2	Companhia A	16:14 PM	16:12 PM	1	16:16 PM	00:04:00
24	61	Companhia A	16:15 PM	16:12 PM	1	16:18 PM	00:06:00
25	117	Companhia A	16:19 PM	16:32 PM	1	16:19 PM	00:00:00
26	90	Companhia A	16:22 PM	16:13 PM	1	16:20 PM	00:07:00
27	108	Companhia B	16:20 PM	16:25 PM	1	16:21 PM	00:01:00
28	5	Companhia A	16:23 PM	16:31 PM	1	16:24 PM	00:01:00
29	6	Companhia A	16:25 PM	16:39 PM	1	16:27 PM	00:02:00
30	62	Companhia A	16:19 PM	16:18 PM	1	16:30 PM	00:12:00
31	35	Companhia A	16:26 PM	16:27 PM	1	16:32 PM	00:06:00
32	54	Companhia B	16:33 PM	16:37 PM	1	16:34 PM	00:01:00
33	9	Companhia A	16:36 PM	16:46 PM	1	16:36 PM	00:00:00
34	64	Companhia A	16:34 PM	16:31 PM	1	16:36 PM	00:05:00
35	112	Companhia A	16:37 PM	16:49 PM	1	16:38 PM	00:01:00
36	4	Companhia A	16:42 PM	16:48 PM	1	16:42 PM	00:00:00
37	7	Companhia A	16:43 PM	16:49 PM	1	16:44 PM	00:01:00
38	32	Companhia A	16:46 PM	16:56 PM	1	16:46 PM	00:00:00

39	59	Companhia A	16:46 PM	16:52 PM	1	16:48 PM	00:02:00
40	85	Companhia A	16:48 PM	16:51 PM	1	16:50 PM	00:02:00
41	128	Companhia B	18:45 PM	18:37 PM	1	18:37 PM	00:00:00
42	98	Companhia B	18:47 PM	18:38 PM	1	18:39 PM	00:01:00

Dos 64 *slots* disponíveis para alocação, somente foram alocados 42 *slots*. Os voos que não são alocados recebem a classificação de *NOSLOT*.

Essa classificação pode ocorrer quando não é vantajoso para o voo ser alocado em algum *slot*, geralmente quando o atraso ultrapassa 30 minutos ou quando não houver *slot* disponível naquela faixa de tempo. Se isso ocorrer a aeronave irá voar por fora da FCA. A tabela 7.7 apresenta 15 voos deste estudo de caso que receberam a classificação de *NOSLOT*. O restante dos voos não alocados pode ser verificado no Apêndice C.

Tabela 7.7: Voos não alocados.

VOO	CIA_AEREA	ENT_FCA1	ENT_FCA2	FCA	SLOT
17	Companhia B	18:17 PM	18:22 PM	1	NOSLOT
33	Companhia A	17:01 PM	16:54 PM	1	NOSLOT
49	Companhia B	18:28 PM	18:39 PM	1	NOSLOT
65	Companhia A	17:02 PM	17:05 PM	1	NOSLOT
97	Companhia B	17:47 PM	17:49 PM	1	NOSLOT
129	Companhia B	18:36 PM	18:46 PM	1	NOSLOT
12	Companhia A	17:35 PM	17:41 PM	1	NOSLOT
44	Companhia B	18:57 PM	19:06 PM	1	NOSLOT
60	Companhia A	17:10 PM	17:08 PM	1	NOSLOT
76	Companhia B	19:07 PM	19:09 PM	1	NOSLOT
92	Companhia A	16:49 PM	16:41 PM	1	NOSLOT
124	Companhia B	17:25 PM	17:26 PM	1	NOSLOT
23	Companhia B	19:06 PM	19:08 PM	1	NOSLOT
39	Companhia A	17:16 PM	17:26 PM	1	NOSLOT
71	Companhia B	18:23 PM	18:26 PM	1	NOSLOT

Durante a execução da Aplicação de Alocação do CTOP com AG, na geração inicial e na última geração após a alocação dos voos nos conjuntos de *slots* foram obtidos os

seguintes valores de atraso dos voos, conforme a Tabela 7.8.

	Geração Inicial	Melhor Geração
Companhia Aérea A	754	68
Companhia Aérea B	875	5
Total	1629	73

Tabela 7.8: Atraso, em minutos, na geração inicial e na melhor geração da Aplicação.

A Tabela 7.9 apresenta o atraso geral, que é a soma dos atrasos das companhias aéreas, e o atraso por companhia aérea em todos os voos capturados durante a execução da Aplicação de Alocação do CTOP com AG. São apresentados os atrasos, a quantidade de *slots* com voos alocados e sem voos alocados em cada geração do AG.

Com essas informações é possível verificar que há um decaimento do atraso a partir da primeira geração e que o menor atraso geral é obtido na última geração, correspondendo ao melhor conjunto de *slots*.

A Tabela 7.9 apresenta as 20 primeiras gerações do AG. As demais gerações podem ser verificadas no Apêndice D. É possível identificar que há uma evidente diminuição do atraso comparando a geração inicial e a última geração, comprovando que a busca, a troca e alocação em um novo e melhor conjunto de *slots* em cada geração gera a diminuição dos atrasos.

Tabela 7.9: Atrasos e alocação dos voos durante as gerações.

GERAÇÃO	SLOTS ALOCADOS	SLOTS SEM VOOS	ATRASSO GERAL	ATRASSO CIA A	ATRASSO CIA B
1	64	0	1629	754	875
2	64	0	1589	739	850
3	64	0	1537	783	754
4	64	0	1581	716	865
5	64	0	1518	687	831
6	64	0	1496	681	815
7	64	0	1491	700	791
8	64	0	1414	621	793
9	64	0	1474	641	833
10	64	0	1454	596	858
11	64	0	1482	629	853
12	64	0	1458	656	802

13	64	0	1452	643	809
14	64	0	1436	680	756
15	64	0	1413	655	758
16	64	0	1381	587	794
17	64	0	1372	632	740
18	64	0	1342	587	755
19	64	0	1279	593	686
20	64	0	1300	625	675

7.4 Resultados Obtidos

Conforme já especificado na seção 7.3 em cada cenário do estudo de caso a Aplicação foi executada 100 vezes para identificação dos melhores parâmetros e da convergência do AG para um melhor resultado final.

Em cada cenário pode ocorrer da quantidade de voos não ser exata à distribuição proposta, sendo então um valor aproximado. Isso ocorre devido ao algoritmo de simulação e criação de novos voos que toma como base as informações de voos reais do espaço aéreo brasileiro.

7.4.1 Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B

Horário de Pico

Neste subcenário foram utilizados 135 voos. Dentre esses, 65 voos da *Companhia Aérea A* e 70 voos da *Companhia Aérea B*.

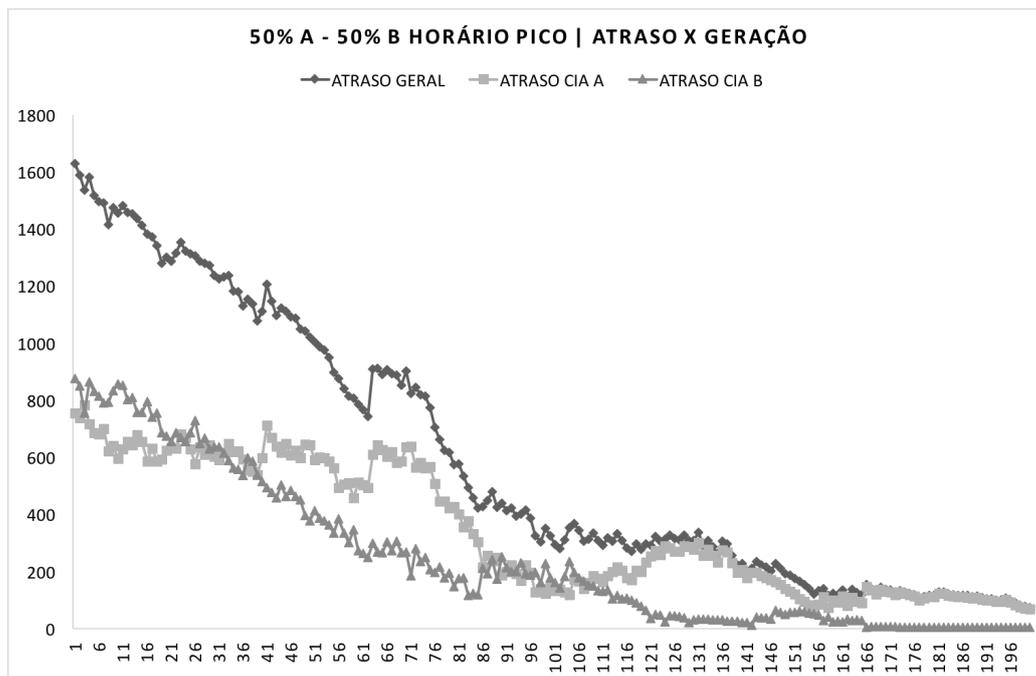


Figura 7.3: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário de Pico.

A Figura 7.3 mostra o atraso Geral e os atrasos da *Companhia Aérea A* e *Companhia Aérea B* durante a execução do Aplicação de Alocação com AG. É possível verificar que em comparação com a Alocação Geral do CTOP (1ª geração) há um decaimento dos atrasos durante a execução do AG, alcançando menores e melhores valores na última geração.

O menor valor para o atraso geral foi 73 minutos. Para o o atraso da *Companhia Aérea A* foi 68 minutos e para o atraso da *Companhia Aérea B* foi 5 minutos. Todos esses valores ocorreram na última geração, a de número 200.

A Aplicação de Alocação com AG, reduziu o atraso geral em aproximadamente 95%, o atraso da *Companhia Aérea A* em 90% e da *Companhia Aérea B* em 99%.

Na Figura 7.3 é possível verificar que em torno das gerações 154 e 156 os valores dos atrasos das companhias aéreas são próximos, sendo então a alocação do conjunto de *slots* presente nesta geração o mais justo para as duas companhias aéreas. No entanto, o objetivo principal da alocação de *slots* é uma melhor alocação de maneira que o atraso geral que engloba todas as companhias aéreas seja o menor, mesmo que haja uma discrepância de valores de atrasos entre as companhias aéreas, neste caso ambas com a mesma proporção de voos.

A Figura 7.4 apresenta os valores da média dos atrasos em toda a execução da Aplicação de Alocação com AG e o valores dos atrasos para a Aplicação Geral do CTOP. Em todos os atrasos o valor da média dos atrasos na execução da Aplicação com AG é menor que o atraso da Aplicação Geral do CTOP.

Comparando com o atraso da Aplicação de Alocação do CTOP, a média do atraso geral durante a execução da Aplicação de Alocação com AG é menor em 63%, da *Companhia Aérea A* é 54% menor e da *Companhia Aérea B* é 71% menor.

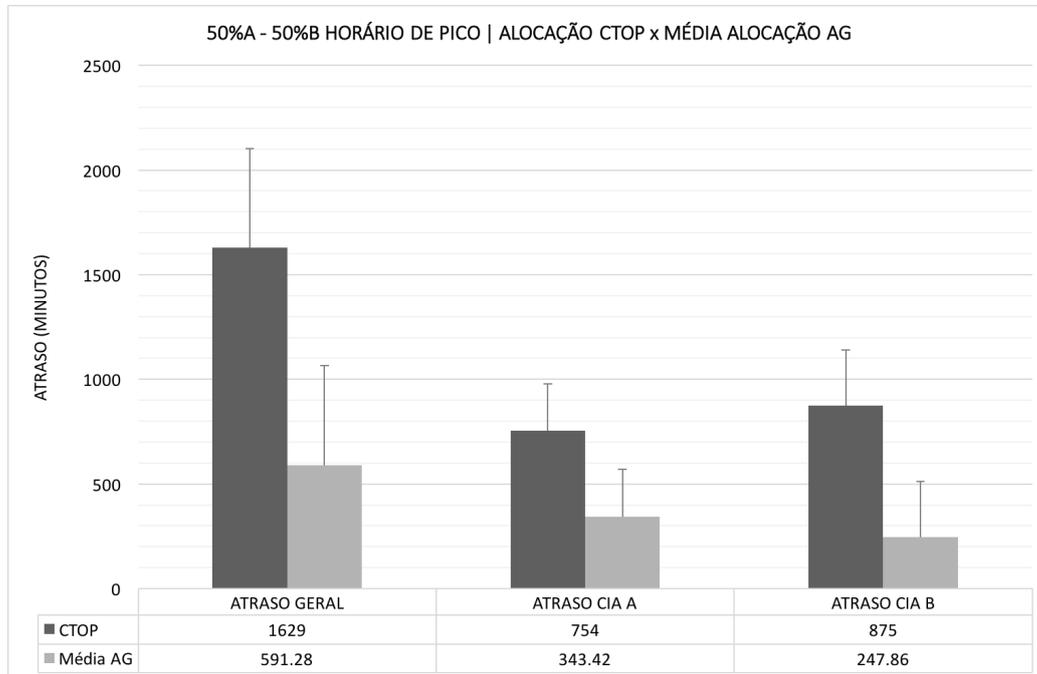


Figura 7.4: Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário de Pico.

Horário Normal

Neste subcenário foram utilizados 96 voos. Dentre esses, 48 voos da *Companhia Aérea A* e 48 voos da *Companhia Aérea B*.

Na Figura 7.5 são apresentados o atraso geral e o atraso por companhia aérea. Conforme a Figura 7.5, é notória a diminuição dos atrasos obtidos durante as gerações da execução da Aplicação de Alocação com AG comparando com os obtidos na Aplicação Geral do CTOP.

Neste cenário, durante a execução da Aplicação de Alocação com AG o menor valor para o atraso geral foi de 135 minutos, obtido na última geração, de número 170. O menor valor para o atraso da *Companhia Aérea A* foi de 87 minutos, obtido na geração 148. Para a *Companhia Aérea B* o menor valor foi de 29 minutos, este também ocorrendo na última geração.

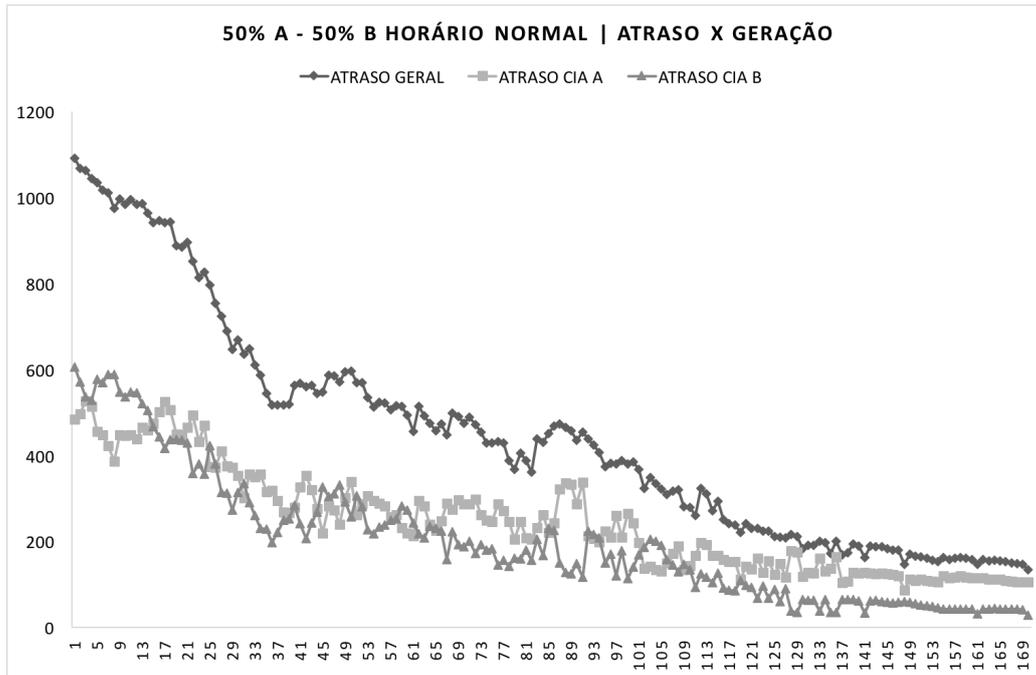


Figura 7.5: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário Normal.

Com a Aplicação de Alocação com AG, para este cenário, foi possível reduzir o atraso geral em 87%, o atraso da *Companhia Aérea A* em 78% e o da *Companhia Aérea B* em 95%.

Semelhante ao ocorrido no subcenário anterior, Horário de Pico, há uma geração durante a execução do AG em que os valores de atraso para as duas companhias aéreas são próximos. Isto ocorre na geração 119, com 112 minutos de atraso para a *Companhia Aérea A* e 109 *Companhia Aérea B*. Porém o atraso geral não é o mínimo obtido durante a execução da Aplicação de Alocação com AG.

Com a mesma quantidade de voos iniciais para cada companhia aérea, é possível observar que os valores de atraso para as duas companhias aéreas ficam sempre próximos durante todas as gerações da Aplicação de Alocação com AG.

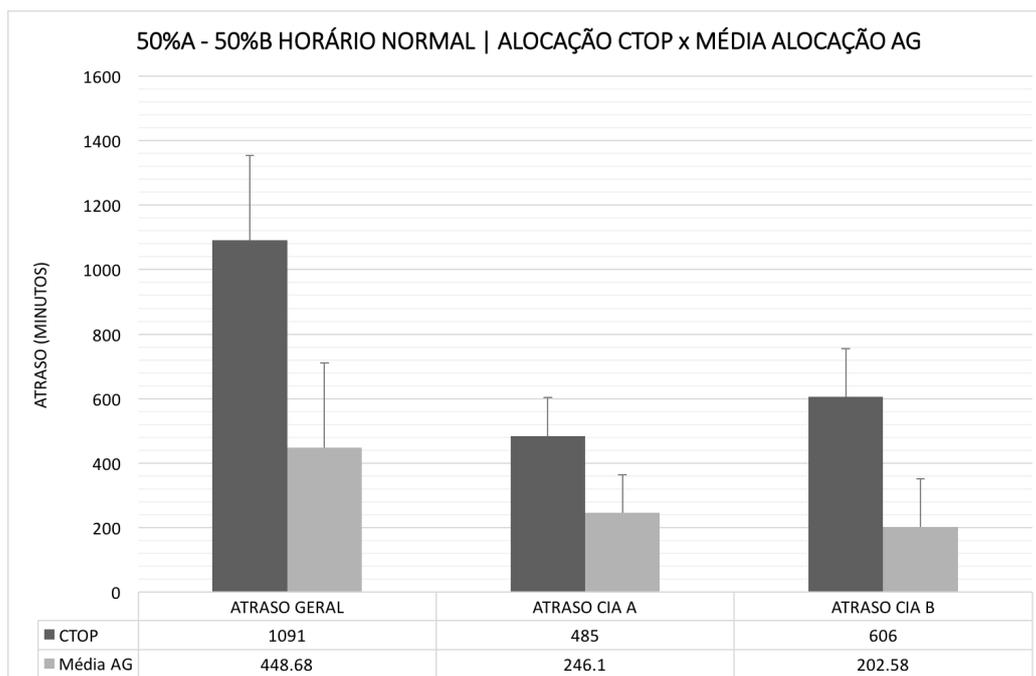


Figura 7.6: Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 1 - 50% Cia A - 50% Cia B - Horário Normal.

Na Figura 7.6 são apresentados o valor da média do atraso geral e o valor da média do atraso da *Companhia Aérea A* e *Companhia Aérea B* durante a execução da Aplicação de Alocação com AG. Conforme a representação, todos os valores das médias dos atrasos durante a execução da Aplicação de Alocação com AG são menores que o valor obtido na Alocação Geral do CTOP.

De acordo com a Figura 7.6, comparando os valores de atrasos da Aplicação Geral do CTOP com as médias de atrasos obtidas da Aplicação de Alocação com AG foi obtida uma melhora de 58% para o atraso geral, para a *Companhia Aérea A* uma melhora de 49% e para a *Companhia Aérea B* uma melhora de 66%.

Comparando com os valores obtidos neste subcenário de Horário de Normal com o subcenário anterior de Horário de Pico, obteve-se uma melhora na média dos atrasos durante a execução da Aplicação de Alocação com AG.

7.4.2 Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B

Horário de Pico

Para este subcenário foram utilizados 135 voos no total. Dentre esses 100 voos para a *Companhia Aérea A* e 35 para a *Companhia Aérea B*.

Na Figura 7.7 é possível verificar o atraso geral e os atrasos por companhia aérea. De acordo com a Figura 7.7, os atrasos diminuem no decorrer das gerações da Aplicação de

Alocação com AG, sendo estes menores que o atraso obtido na Aplicação Geral do CTOP, o mesmo da geração inicial do AG.

Na execução deste subcenário, o menor valor de atraso geral obtido na Aplicação de Alocação com AG foi de 173 minutos ocorrendo na última geração, de número 200. Para o atraso da *Companhia Aérea A*, o menor valor também foi obtido na última geração, 160 minutos. O menor valor de atraso para a *Companhia Aérea B* foi 7 minutos, ocorrendo na geração 194.

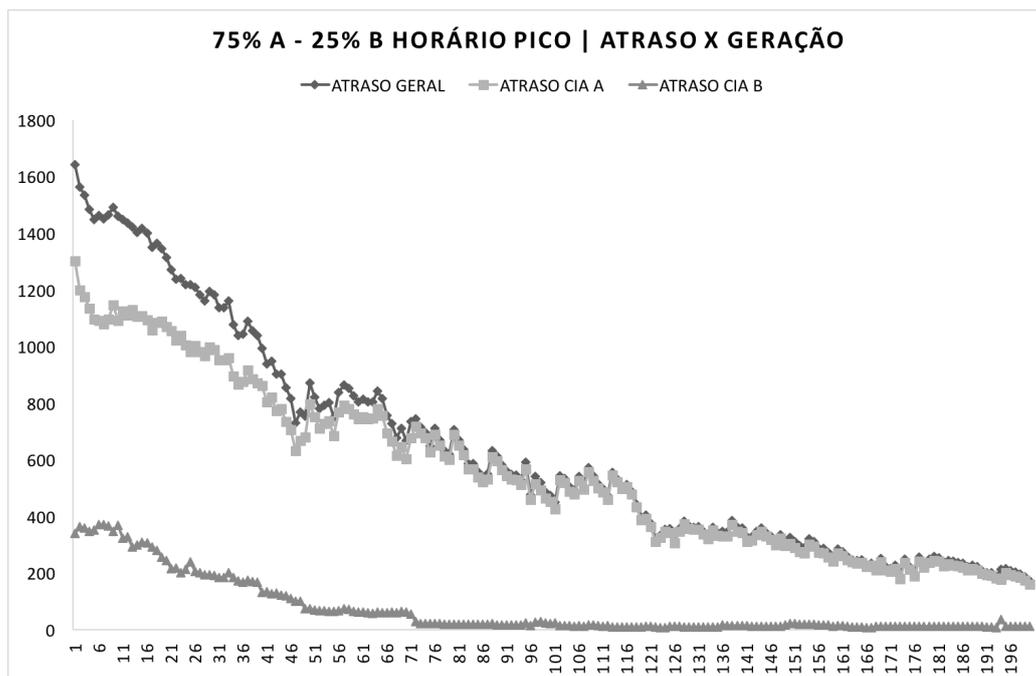


Figura 7.7: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário de Pico.

É possível verificar na Figura 7.7 que os valores de atraso da *Companhia Aérea A* têm comportamento semelhante ao atraso geral durante as gerações da Aplicação de Alocação com AG, comprovando a maior proporção de voos da *Companhia Aérea A* para este subcenário.

Após a execução da Aplicação de Alocação com AG, há uma redução do atraso geral em 89%, o atraso da *Companhia Aérea A* em 87% e o da *Companhia Aérea B* em 96%.

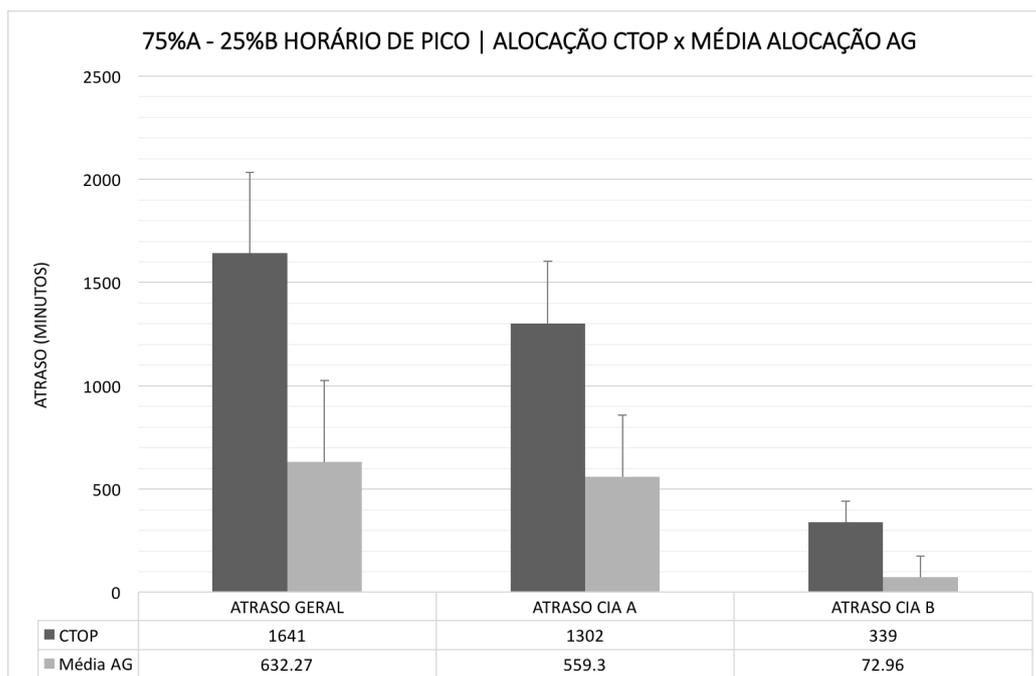


Figura 7.8: Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário de Pico

Os valores da média do atraso geral e atrasos das duas companhias aéreas do estudo de caso obtidos durante a execução da Aplicação de Alocação com AG são apresentados na Figura 7.6, estes menores que o valor inicial, obtido na Alocação Geral do CTOP.

Para o valor da média de atraso geral obtida na execução da Aplicação de Alocação com AG, em comparação com o valor da execução da Alocação Geral do CTOP, obteve-se uma melhora de 61%. Para o valor da *Companhia Aérea A*, obteve-se uma melhora de 57% e para a *Companhia Aérea B* uma melhora de 78%.

Horário normal

Neste subcenário foram utilizados 96 voos. Dentre esses, 72 voos da *Companhia Aérea A* e 24 voos da *Companhia Aérea B*.

São apresentados na Figura 7.9 os valores de atraso geral, atraso da *Companhia Aérea A* e atraso da *Companhia Aérea B*. Valores que decaem durante ao longo das gerações da Aplicação de Alocação com AG.

Durante a execução da Aplicação de Alocação com AG o menores valores de atraso geral e atraso da *Companhia Aérea A*, 128 minutos e 113 minutos respectivamente, foram obtidos na geração de número 170, a última geração. O menor valor de atraso para a *Companhia Aérea B* foi obtido na geração 117.

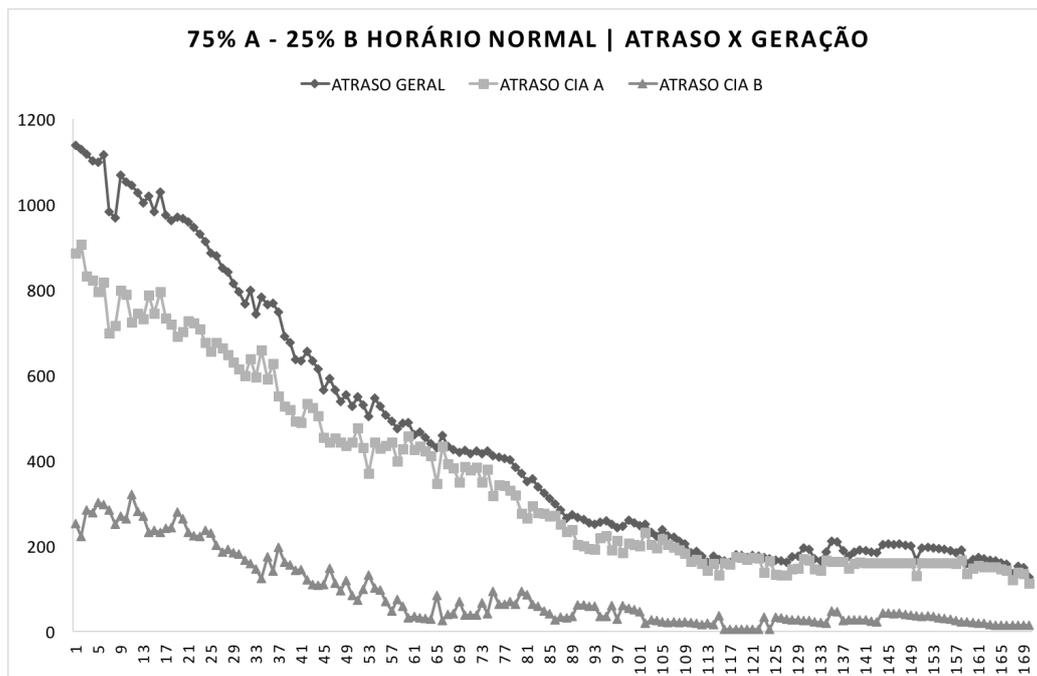


Figura 7.9: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário Normal.

Neste subcenário, com a Aplicação de Alocação com AG, foi possível reduzir o atraso geral em 88%, o atraso da *Companhia Aérea A* em 87% e o da *Companhia Aérea B* em 94%. Esses valores de otimização foram semelhantes ao subcenário anterior de Horário de Pico para a mesma proporção de voos.

Esta mesma proporção de voos, também permite que o comportamento do atraso geral e atraso da *Companhia Aérea A* seja semelhante ao ocorrido no subcenário anteriormente citado, confirmando o comportamento de quando há uma maior proporção de voos para uma companhia aérea.

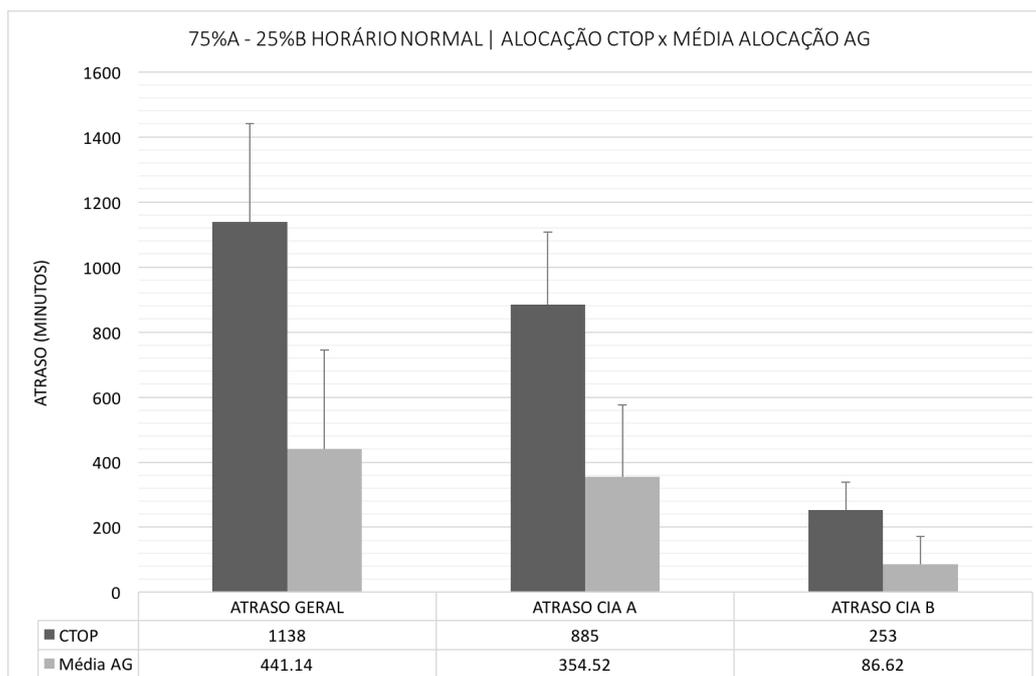


Figura 7.10: Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 2 - 75% Cia A - 25% Cia B - Horário Normal.

Na Figura 7.10 são apresentados os valores da média do atraso geral, média do atraso da *Companhia Aérea A* e média do atraso da *Companhia Aérea B* durante a execução da Aplicação de Alocação com AG, menores que os valores de atrasos da Alocação Geral do CTOP.

Comparando esses valores de média do atraso geral e média dos atrasos das companhias aéreas, com os valores da Alocação Geral do CTOP, foram obtidas as seguintes melhorias: no atraso geral, 61%, no atraso da *Companhia Aérea A*, 60%, e no atraso da *Companhia Aérea B*, 65%.

7.4.3 Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B

Horário de Pico

Foram utilizados no total para este subcenário 135 voos. Dentre esses 90 voos para a *Companhia Aérea A* e 45 para a *Companhia Aérea B*.

Na Figura 7.11 são apresentados os valores de atraso geral, atraso da *Companhia Aérea A* e atraso da *Companhia Aérea B* durante a execução da Aplicação de Alocação com AG, decaindo durante as gerações do AG.

A última geração, geração 200, apresenta os menores valores de atraso geral, atraso da *Companhia Aérea A* e atraso da *Companhia Aérea B*, sendo esses 100 minutos, 94 minutos e 6 minutos, respectivamente. Porém, diferentemente do atraso geral e do atraso

da *Companhia Aérea A*, o menor valor de atraso da *Companhia Aérea B* foi obtido na geração 149, permanecendo esse valor até o final da execução do AG.

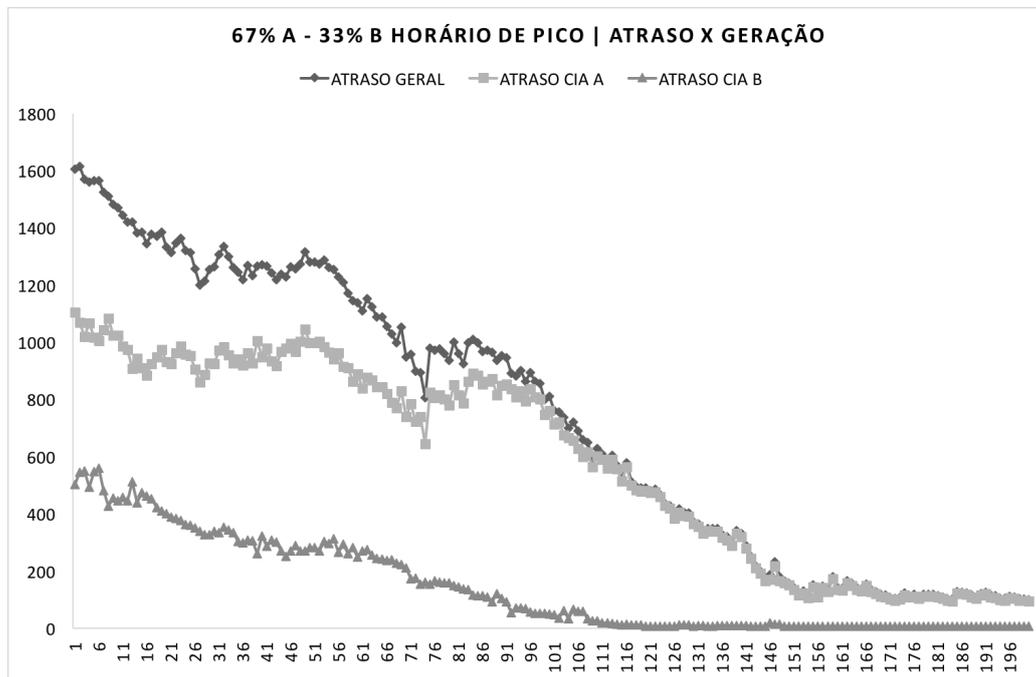


Figura 7.11: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário de Pico.

A Aplicação de Alocação com AG neste cenário, gerou a redução do atraso geral em 93%, o atraso da *Companhia Aérea A* em 91% e o da *Companhia Aérea B* em 98%. Por manter uma maior proporção de voos, a otimização da *Companhia Aérea A* foi bem semelhante ao atraso geral, conforme ilustrado na Figura 7.11.

De acordo com a Figura 7.11, o valor de atraso para a *Companhia Aérea B* permaneceu o mesmo a partir da geração 149. O AG encontrou o conjunto ótimo nessa geração e então manteve até o término da execução da Aplicação de Alocação com AG.

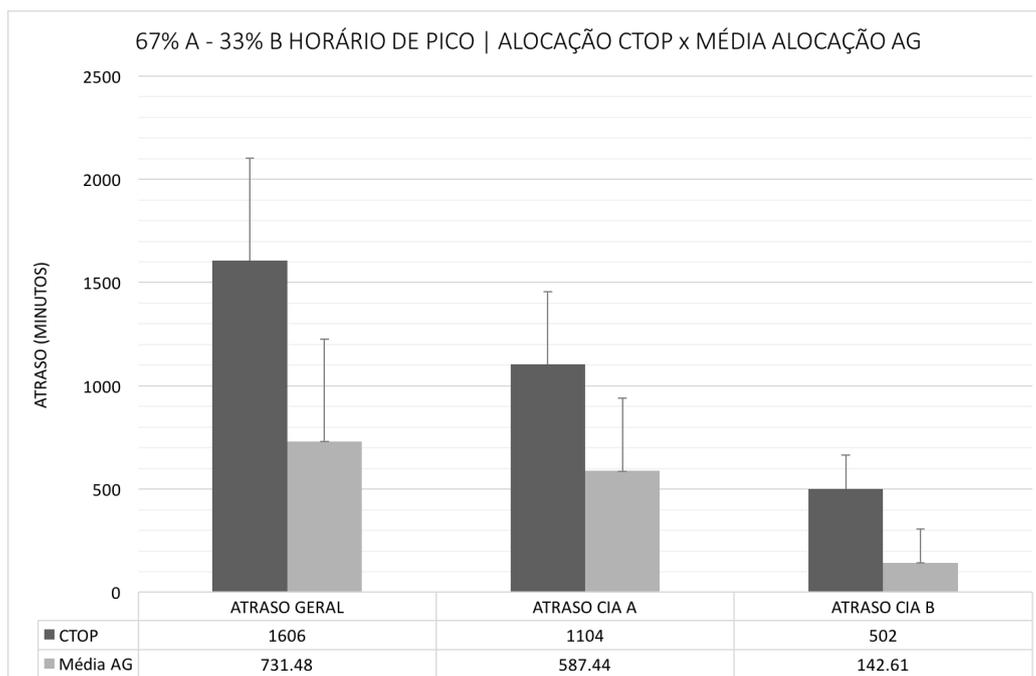


Figura 7.12: Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário de Pico.

Os valores de média de atraso geral, média do atraso da *Companhia Aérea A* e média do atraso da *Companhia Aérea B* obtidos durante as gerações da Aplicação de Alocação com AG são apresentados na Figura 7.12, permanecendo as médias sempre menores que os valores iniciais de atraso.

Comparando esses valores de média do atraso geral e média dos atrasos das companhias aéreas, com os valores da Alocação Geral do CTOP, foram obtidas as seguintes melhorias: no atraso geral, 54%, no atraso da *Companhia Aérea A*, 46%, e no atraso da *Companhia Aérea B*, 71%.

Horário normal

Neste subcenário foram utilizados 96 voos. Dentre esses, 69 voos da *Companhia Aérea A* e 27 voos da *Companhia Aérea B*.

A Figura 7.13, apresenta os valores de atraso geral, atraso da *Companhia Aérea A* e atraso da *Companhia Aérea B* no decorrer da execução da Aplicação de Alocação com AG. Conforme ilustrado, os valores decaem durante toda execução do AG.

Os menor do atraso geral, 176 minutos, e do atraso da *Companhia Aérea B*, 9 minutos, foi obtido na última geração, a geração 170. O menor valor de atraso da *Companhia Aérea B*, 132 minutos, foi obtido na geração 89.

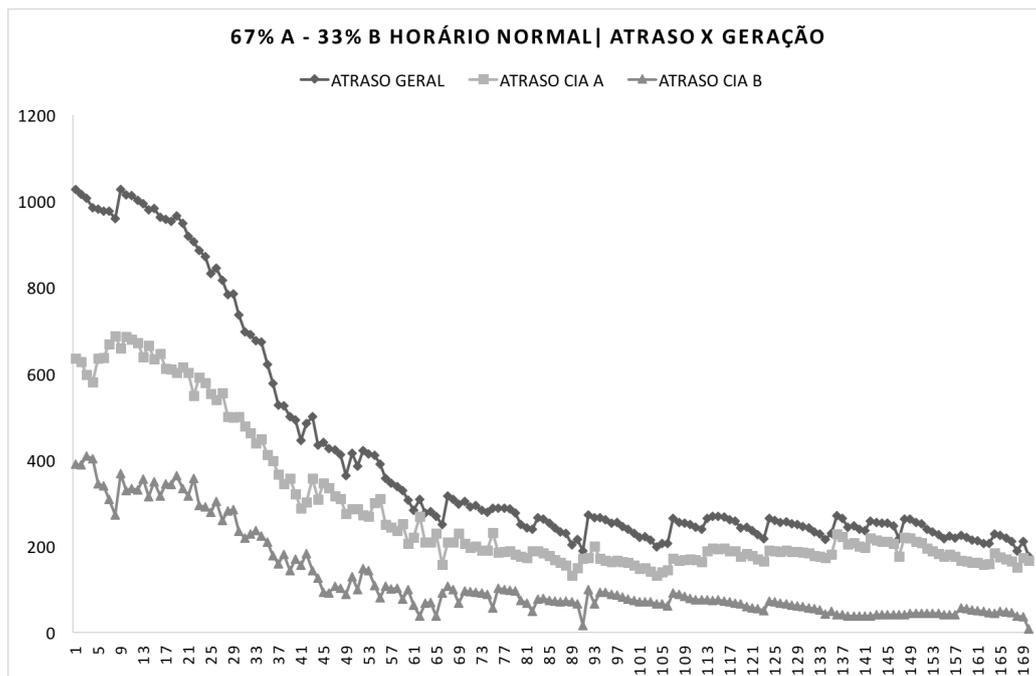


Figura 7.13: Atraso geral e específico por cada companhia aérea em cada geração do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário Normal.

A Aplicação de Alocação com AG, gerou uma redução do atraso geral em 82%, do atraso da *Companhia Aérea A* em 73% e do atraso da *Companhia Aérea B* em 97%.

Este subcenário, seguiu o comportamento já citado em outros subcenários, onde o atraso da *Companhia Aérea A* é semelhante ao atraso geral, conforme a Figura 7.13, confirmando o comportamento de quando há uma maior proporção de voos para uma determinada companhia aérea.

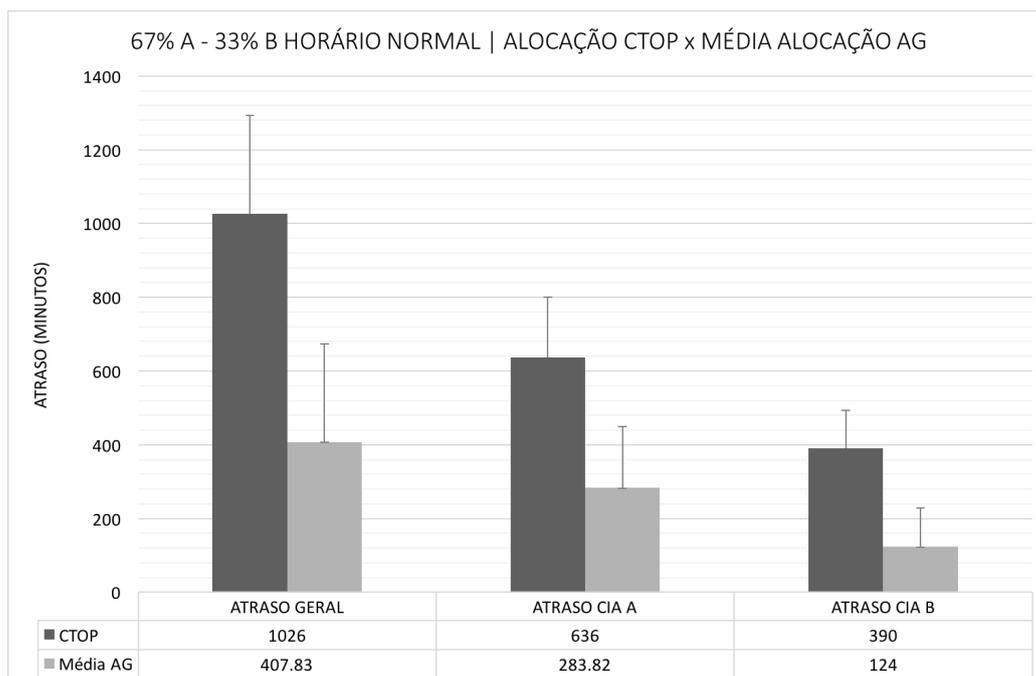


Figura 7.14: Média do atraso geral e específico por companhia aérea durante execução do AG - Cenário 3 - 67% Cia A - 33% Cia B - Horário Normal.

Na Figura 7.14 são apresentados os valores da média do atraso geral, média do atraso da *Companhia Aérea A* e média do atraso da *Companhia Aérea B* no decorrer da Aplicação de Alocação com AG. Da mesma forma que os outros subcenários, as médias são menores que os valores de atraso da Alocação Geral do CTOP.

Comparando os valores das médias com os valores da Alocação Geral do CTOP neste subcenário, houve uma otimização de 60% no atraso geral, 55% no atraso da *Companhia Aérea A* e 68% no atraso da *Companhia Aérea B*.

7.4.4 Desempenho

O desempenho da Aplicação utilizando AG durante a execução dos diversos cenários e subcenários do estudo de caso é apresentado na Tabela 7.10. O tempo de execução, em segundos, foi obtido a partir da média do tempo de execução de todas as execuções de cada caso. A Tabela 7.10 também apresenta o desvio padrão do tempo de execução em cada subcenário.

Cenário	Tempo (s)	Desvio Padrão (s)
50% 50% - Pico	109,9	6,4
50% 50% - Normal	80,1	2,2
75%25% - Pico	111,3	8,9
75%25% - Normal	84,4	7,9
67%33% - Pico	104,7	2,5
67%33% - Normal	82,7	6,1

Tabela 7.10: Média do tempo de execução por cenário

Conforme verificado na Figura 7.15, os tempos de execução dos subcenários se assemelham independente da proporção de voos por companhia aérea utilizada no estudo de caso. No entanto, o tempo de execução varia de acordo com o período do estudo de caso. No Horário de Pico há um aumento do tempo de execução e no Horário Normal há uma diminuição do tempo de execução em comparação com o Horário de Pico.

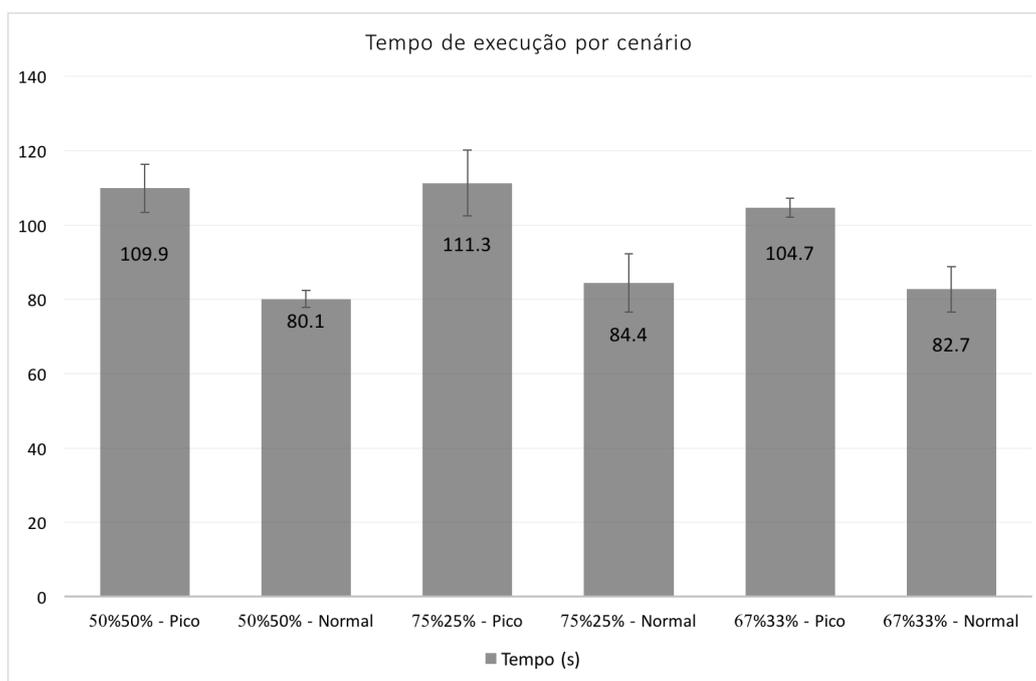


Figura 7.15: Médias dos tempos de execução dos cenários e subcenários durante o estudo de caso.

Capítulo 8

Conclusão

A iniciativa CTOP conseguiu alcançar resultados notáveis nos EUA, possibilitando que as companhias aéreas compartilhassem suas preferências de rotas para a FAA e assim criando uma chance de melhorar suas metas de negócios em relação a cada voo e seu ambiente.

Ambientada no CTOP simulado no espaço aéreo brasileiro, a execução desta pesquisa proporcionou a apresentação de uma solução computacional utilizando Algoritmos Genéticos de otimização da alocação geral do CTOP já existente.

Este capítulo apresentará as conclusões da pesquisa realizada. Na Seção 8.1 é feita uma análise conclusiva dos resultados apresentando também as contribuições obtidas. As propostas de trabalhos futuros serão apresentadas na Seção 8.2.

8.1 Análise Conclusiva

Há uma constante e crescente evolução de métodos e aprimoramentos do gerenciamento do tráfego aéreo que buscam primordialmente a melhora dos níveis de segurança, fluidez e qualidade dos serviços prestados aos usuários e clientes do espaço aéreo.

Diante desta necessidade e dos objetivos do CTOP, é proposto nesta pesquisa um sistema de suporte à decisão utilizando um modelo de solução computacional com Algoritmos Genéticos para otimização da alocação de voos e *slots* do CTOP ambientado no espaço aéreo brasileiro, de forma que resolva o problema dos atrasos de voos que enfrentem situações adversas e imprevisíveis do espaço aéreo.

Todo o ambiente do CTOP já implementado nos EUA foi verificado de forma que fosse adaptado e assim implementada a simulação com voos, rotas, aeronaves e aeroportos do espaço aéreo brasileiro. Após esse dimensionamento, foi desenvolvida para resolução do problema proposto a Aplicação de Alocação com AG que teve como base para otimização a Aplicação do CTOP para Alocação de *slots*.

Seguindo todo o crescimento de buscas por novas soluções que atendam os problemas complexos no dia-a-dia do gerenciamento do tráfego aéreo, principalmente por lidar com questões severas de segurança, esta pesquisa buscou a utilização de uma técnica inserida na Inteligência Artificial. Vários autores já implementaram modelos e soluções com resultados satisfatórios seguindo técnicas derivadas desse ramo da Computação, validando então a proposta de utilização de Algoritmos Genéticos nesta pesquisa.

A solução computacional desenvolvida nesta pesquisa permite que os especialistas dos órgãos responsáveis analisem uma alocação de *slots* do CTOP de forma otimizada, sugerindo então uma alocação que diminua os impactos gerados por atrasos e outras eventuais situações do espaço aéreo.

Gerando uma redução de atrasos considerável comparando com as soluções do CTOP já utilizadas atualmente, também foi possível com os algoritmos e sistemas apresentados uma otimização da alocação de *slots*. Essa nova alocação de *slots* permitiu que todos os *slots* definidos nas FCAs fossem alocados e os voos restantes passíveis de restrição pudessem voar por foram das FCAs.

A utilização de Algoritmos Genéticos na implementação da otimização possibilitou a busca por esse conjunto ótimo de *slots*, de forma que a alocação dos voos nesse conjunto de *slots* gerasse um menor atraso comparando com o conjunto de *slots* inicialmente proposto para aquela demanda CTOP.

Com dados reais do espaço aéreo brasileiro foram simulados 3 cenários de distribuições distintas de voos entre duas companhias aéreas ambientados em duas faixas de horário, horário normal e horário de pico. Na simulação as duas companhias aéreas enviaram informações de seus voos para disputa dos *slots* da FCA de determinada demanda CTOP.

A Aplicação de Alocação com AG foi executada utilizando os dados oriundos desses cenários, resultando em informações derivadas dos conjuntos de *slots* otimizados obtidos. Após análise dos resultados obtidos do estudo de caso, conclui-se que independente do cenário e proporção utilizada, obteve-se otimização do conjunto de *slot* e conseqüentemente a diminuição de atraso para aquela demanda CTOP simulada.

Essas informações são bastante favoráveis para uma utilização desta solução por atores e especialistas de órgãos responsáveis pelo gerenciamento do tráfego aéreo. Seguindo um dos objetivos do CTOP, de satisfazer as metas de negócio das companhias aéreas permitindo o envio das preferências de trajetórias dos voos capturados na demanda CTOP, esta pesquisa permitiu a diminuição dos atrasos dos voos de ambas companhias aéreas envolvidas nos cenários do estudo de caso.

Em um cenário mais justo, onde as duas companhias aéreas tem a mesma proporção de voos e em um intervalo de horário de pico, o modelo proposto permitiu uma redução do atraso geral de todos os voos capturados em até 1556 minutos, e para determinada

companhia aérea em até 870 minutos.

Durante todos os casos e cenários executados, o modelo proposto obteve melhora nos atrasos dos voos capturados, alcançando assim resultados superiores à alocação geral do CTOP. Mesmo em um cenário de pico com uma maior proporção para determinada companhia aérea o modelo gerou resultados satisfatórios para as companhias aéreas envolvidas e para o órgão responsável pela alocação. O modelo reduziu o atraso da companhia com maior proporção em 87%, da companhia com menor proporção em 96% e o atraso geral em 89%.

A execução desta aplicação com dados simulados a partir de dados reais do espaço aéreo brasileiro ainda é primitiva. Espera-se para um futuro a execução dessa proposta de abordagem em tempo real, em operações táticas do ATM, com dados reais e sem simulação do espaço aéreo brasileiro.

A configuração do espaço aéreo brasileiro atualmente é limitada na quantidade de rotas de voos das aeronaves, gerando dificuldade no enquadramento e definição da proposta de implementação do CTOP norte-americano no Brasil.

Porém essa limitação poderá ser suprida em um cenário futuro com o aprimoramento e reformulação de todo sistema aéreo brasileiro, buscando uma maior segurança e fluidez e permitindo a implementação do CTOP e utilização do modelo inovador proposto por esta pesquisa.

8.2 Proposta de Pesquisa Futura

Foi verificado que existem diversas características e melhorias que devem ser consideradas em uma futura implementação do CTOP no Brasil. Para uma efetivação bem sucedida deste programa no espaço aéreo brasileiro poderá ser necessária a verificação de toda a evolução já existente do CTOP nos EUA, assim avaliando a melhor alternativa e adequação para implementação na necessidade brasileira.

Alguns pontos poderão ser destacados para futuras pesquisas:

- A utilização de outros tipos de avaliação e seleção para implementação do Algoritmo Genético utilizado no modelo.
- A utilização de um maior número de voos, maior quantidade de FCAs e companhias aéreas.
- A verificação de métodos que mantenham ou aprimorem o desempenho computacional deste modelo em um ambiente com maior quantidade de voos e companhias aéreas, tal como o espaço aéreo norte-americano.

- A execução do modelo considerando apenas os aeroportos de maior movimento no Brasil e inclusão de voos internacionais.
- O planejamento de uma estratégia para tratamento dos voos que não obtiveram *slots* durante alocação e execução do modelo.

Outra sugestão para pesquisas futuras, é a comparação deste modelo com outras alternativas já existentes na literatura para otimização de alocação e diminuição de atrasos no CTOP, adequando os ambientes e cenários de maneira similar permitindo tal verificação e avaliação.

Referências

- [1] FAA: *Classes of airspace*. (Online)Disponível:https://www.faasafety.gov/gslac/ALC/course_content.aspx?cID=42&sID=505&preview=true. 12, 21
- [2] Goldberg, David E: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, 1989*. Reading: Addison-Wesley, 1989. 12, 30, 31, 34
- [3] Crespo, Antonio Márcio Ferreira: *Aprendizagem por reforço aplicada ao gerenciamento tático do fluxo de tráfego aéreo*. 2011. 12, 44, 46
- [4] Cruciol, Leonardo LBV, Li Weigang, John Paul Clarke e Leihong Li: *Air traffic flow management data mining and analysis for in-flight cost optimization*. Em *Engineering and Applied Sciences Optimization*, páginas 73–86. Springer, 2015. 12, 22, 42, 47, 48, 49, 59, 60, 62
- [5] Kim, Bosung e John Paul Clarke: *Optimal airline actions during collaborative trajectory options programs*. 2014. 12, 22, 50, 55, 56, 57, 58, 73
- [6] Ferreira, Déborah Mendes e Lucas Pessoa Rosa: *Utilização de algoritmos genéticos para sequenciamento de partidas em aeroportos*. 2014. 12, 15, 53, 54, 55
- [7] Oliveira, Lucília Pereira de: *Sistema para Otimização do Gerenciamento de Tráfego Aéreo Brasileiro com o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo*. Tese de Doutorado, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brazil, 2018. 12, 15, 63, 66, 67, 68
- [8] Infraero: *História da infraero*. (Online)Disponível:<http://www4.infraero.gov.br/sobre-a-infraero/historia/>. 18
- [9] Infraero: *Estatísticas de movimentos operacionais de aeronaves nos aeroportos brasileiros*. (Online)Disponível:<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatisticas/estatisticas.html>. 18
- [10] FAA: *Collaborative trajectory options program (ctop)*. 20, 47, 48
- [11] Hart, Peter E, Nils J Nilsson e Bertram Raphael: *A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths*. *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 4(2):100–107, 1968. 20
- [12] Koenig, Sven, Maxim Likhachev e David Furcy: *Lifelong planning A**. *Artificial Intelligence*, 155(1):93–146, 2004. 20

- [13] Bukharov, Oleg E e Dmitry P Bogolyubov: *Development of a decision support system based on neural networks and a genetic algorithm*. Expert Systems with Applications, 42(15):6177–6183, 2015. 20
- [14] FAA: *Nextgen implementation plan*. Washington,DC. 21, 47
- [15] NBAA: *Collaborative trajectory options program (ctop)*. (Online)Disponível: <https://www.nbaa.org/ops/airspace/tfm/tools/ctop.php>. 21
- [16] FAA: *Introduction to collaborative trajectory options program (ctop)*. (Online)Disponível:http://cdm.fly.faa.gov/?page_id=983. 21
- [17] AB, FlightRadar24: *Flightradar24.com - live flight tracker!* (Online)Disponível: <https://www.flightradar24.com>. 24
- [18] FlightAware: *Flightaware - rastreador de voos / estado de voos / rastreo de voos*. (Online)Disponível:<https://pt.flightaware.com>. 24
- [19] ANAC: *Histórico de voos*. (Online)Disponível:<http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/historico-de-voos>. 24
- [20] Holland, John H: *Genetic algorithms*. Scientific american, 267(1):66–73, 1992. 26
- [21] Srinivas, Mandavilli e Lalit M Patnaik: *Genetic algorithms: A survey*. computer, 27(6):17–26, 1994. 26
- [22] Reed, Jon, Robert Toombs e Nils Aall Barricelli: *Simulation of biological evolution and machine learning: I. selection of self-reproducing numeric patterns by data processing machines, effects of hereditary control, mutation type and crossing*. Journal of theoretical biology, 17(3):319–342, 1967. 27
- [23] Holland, John H: *Adaptation in natural and artificial systems. an introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975. 27, 29
- [24] Grefenstette, John J: *Optimization of control parameters for genetic algorithms*. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 16(1):122–128, 1986. 27
- [25] Silva, Angelo José Moreira: *Implementação de um algoritmo genético utilizando o modelo de ilhas*. Rio de Janeiro, 2005. 27
- [26] Castro, Rodrigo Evangelista de: *Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos*. Tese de Doutorado, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2001. 27, 28, 29, 31, 32, 34
- [27] Orr, H Allen: *Fitness and its role in evolutionary genetics*. Nature Reviews Genetics, 10(8):531–539, 2009. 29
- [28] Mitchell, Melanie: *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998. 31
- [29] De Jong, Kenneth Alan: *Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. 1975. 31

- [30] Nayeem, Muhammad Ali, Md Khaledur Rahman e M Sohel Rahman: *Transit network design by genetic algorithm with elitism*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 46:30–45, 2014. 39
- [31] Singh, Vedant, Somesh K Sharma e S Vaibhav: *Transport aircraft conceptual design optimization using real coded genetic algorithm*. International Journal of Aerospace Engineering, 2016, 2016. 40
- [32] Agogino, Adrian e Kagan Tumer: *Learning indirect actions in complex domains: action suggestions for air traffic control*. Advances in Complex Systems, 12(04n05):493–512, 2009. 42
- [33] DECEA: *Regras do ar: Ica 100-12*. (Online)Disponível:<http://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=3953>. 43
- [34] Crespo, AMF, CV d Aquino, BB d Souza, L Weigang, ACMA Melo e DP Alves: *Sistema distribuído de apoio à decisão aplicado ao gerenciamento tático do fluxo de tráfego: Caso cindacta i*. VI Simpósio de Transporte Aéreo, 1:5–8, 2007. 43
- [35] DECEA: *Serviço de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo: Ica 100-22*. (Online) Disponível:<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4610>. 44, 46
- [36] DECEA: *Regras de alocação de slot para aviação geral em aeródromos coordenados: Ica 100-41*. (Online)Disponível:<https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4610>. 45
- [37] DUTRA, LCS: *Glossário aerotécnico: inglês-português*, 1979. 45
- [38] Brasileira, Força Aérea: *Histórico - cgna*. (Online)Disponível:<http://www2.fab.mil.br/cgna/index.php/historico>. 46
- [39] FAA: *This is ctop - an introduction to the collaborative trajectory options program (ctop), and the benefits to the users who participate*. 47
- [40] Novak, M, P Somersall e D Wolford: *Ctop industry day, a seminar on the collaborative trajectory options program*. Relatório Técnico, Tech. rep., US Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2010, 2010. 47
- [41] Golibersuch, M: *Ctop assignment algorithm and substitution processing*. 50
- [42] Ferreira, Deborah Mendes, Lucas Pessoa Rosa, Vitor Filincowsky Ribeiro, Flávio de Barros Vidal e Li Weigang: *Genetic algorithms and game theory for airport departure decision making: Gedman and codman*. Em *International Conference on Knowledge Management in Organizations*, páginas 3–14. Springer, 2014. 53
- [43] Hong, Youkyung, Namhoon Cho, Youdan Kim e Byunghun Choi: *Multiobjective optimization for aircraft arrival sequencing and scheduling*. Journal of Air Transportation, páginas 115–122, 2017. 75

Apêndice A

Voos Utilizados no Estudo de Caso

A tabela A.1 apresenta 135 voos com destino aos aeroportos GRU e CGH.

Tabela A.1: Voos capturados no CTOP com chegada entre 16h e 20.

VOO	CIA_AEREA	PARTIDA	CHEGADA	ORIGEM	DESTINO
1	Companhia A	15:22 PM	16:04 PM	CNF	GRU
2	Companhia A	15:22 PM	16:49 PM	CNF	GRU
3	Companhia A	14:21 PM	16:51 PM	SSA	GRU
4	Companhia A	15:07 PM	17:21 PM	GYN	CGH
5	Companhia A	14:11 PM	17:07 PM	REC	GRU
6	Companhia A	15:20 PM	17:09 PM	BSB	CGH
7	Companhia A	14:58 PM	17:22 PM	BSB	GRU
8	Companhia A	16:15 PM	17:49 PM	CNF	CGH
9	Companhia A	13:43 PM	17:17 PM	REC	CGH
10	Companhia A	13:52 PM	17:53 PM	REC	GRU
11	Companhia A	14:07 PM	17:36 PM	FOR	GRU
12	Companhia A	15:50 PM	18:16 PM	BSB	CGH
13	Companhia A	16:15 PM	17:33 PM	CNF	CGH
14	Companhia B	16:29 PM	18:02 PM	GYN	CGH
15	Companhia B	16:00 PM	18:06 PM	SSA	GRU
16	Companhia B	17:21 PM	18:41 PM	CNF	CGH
17	Companhia B	15:40 PM	18:52 PM	REC	GRU
18	Companhia B	16:39 PM	19:54 PM	SSA	GRU
19	Companhia B	18:23 PM	19:47 PM	CNF	CGH
20	Companhia B	17:47 PM	19:43 PM	BSB	CGH

21	Companhia B	15:45 PM	19:57 PM	FOR	GRU
22	Companhia B	16:48 PM	19:51 PM	REC	GRU
23	Companhia B	18:27 PM	19:41 PM	CNF	GRU
24	Companhia B	18:13 PM	19:39 PM	BSB	GRU
25	Companhia B	17:54 PM	20:01 PM	BSB	CGH
26	Companhia B	18:03 PM	19:33 PM	THE	CGH
27	Companhia B	13:27 PM	16:47 PM	THE	GRU
28	Companhia A	15:21 PM	15:46 PM	CNF	GRU
29	Companhia A	15:15 PM	16:14 PM	CNF	GRU
30	Companhia A	14:16 PM	16:37 PM	SSA	GRU
31	Companhia A	14:56 PM	16:40 PM	GYN	CGH
32	Companhia A	14:11 PM	17:30 PM	REC	GRU
33	Companhia A	15:42 PM	17:34 PM	BSB	CGH
34	Companhia A	14:44 PM	17:20 PM	BSB	GRU
35	Companhia A	15:27 PM	16:58 PM	CNF	CGH
36	Companhia A	14:31 PM	17:32 PM	REC	CGH
37	Companhia A	13:55 PM	17:59 PM	REC	GRU
38	Companhia A	14:14 PM	17:50 PM	FOR	GRU
39	Companhia A	15:45 PM	17:56 PM	BSB	CGH
40	Companhia A	16:19 PM	18:03 PM	CNF	CGH
41	Companhia B	16:32 PM	18:23 PM	GYN	CGH
42	Companhia B	15:57 PM	18:41 PM	SSA	GRU
43	Companhia B	17:04 PM	18:25 PM	CNF	CGH
44	Companhia B	16:13 PM	19:41 PM	REC	GRU
45	Companhia B	16:38 PM	19:51 PM	SSA	GRU
46	Companhia B	18:06 PM	19:15 PM	CNF	CGH
47	Companhia B	17:32 PM	19:43 PM	BSB	CGH
48	Companhia B	16:11 PM	19:21 PM	FOR	GRU
49	Companhia B	16:12 PM	19:11 PM	REC	GRU
50	Companhia B	18:09 PM	20:19 PM	CNF	GRU
51	Companhia B	18:15 PM	19:29 PM	BSB	GRU
52	Companhia B	18:26 PM	20:12 PM	BSB	CGH
53	Companhia B	18:30 PM	19:59 PM	THE	CGH
54	Companhia B	14:01 PM	17:14 PM	THE	GRU
55	Companhia A	14:43 PM	16:19 PM	CNF	GRU

56	Companhia A	15:27 PM	16:11 PM	CNF	GRU
57	Companhia A	14:32 PM	16:40 PM	SSA	GRU
58	Companhia A	14:58 PM	16:45 PM	GYN	CGH
59	Companhia A	14:16 PM	17:30 PM	REC	GRU
60	Companhia A	15:33 PM	17:41 PM	BSB	CGH
61	Companhia A	15:18 PM	16:55 PM	BSB	GRU
62	Companhia A	15:23 PM	16:52 PM	CNF	CGH
63	Companhia A	13:44 PM	17:38 PM	REC	CGH
64	Companhia A	14:35 PM	17:05 PM	REC	GRU
65	Companhia A	13:40 PM	17:38 PM	FOR	GRU
66	Companhia A	16:16 PM	18:08 PM	BSB	CGH
67	Companhia A	16:58 PM	17:54 PM	CNF	CGH
68	Companhia B	17:14 PM	17:50 PM	GYN	CGH
69	Companhia B	16:09 PM	18:20 PM	SSA	GRU
70	Companhia B	17:09 PM	18:36 PM	CNF	CGH
71	Companhia B	16:14 PM	19:04 PM	REC	GRU
72	Companhia B	17:07 PM	19:44 PM	SSA	GRU
73	Companhia B	18:06 PM	19:36 PM	CNF	CGH
74	Companhia B	17:49 PM	19:32 PM	BSB	CGH
75	Companhia B	16:23 PM	19:57 PM	FOR	GRU
76	Companhia B	16:30 PM	19:40 PM	REC	GRU
77	Companhia B	18:49 PM	20:06 PM	CNF	GRU
78	Companhia B	18:14 PM	19:46 PM	BSB	GRU
79	Companhia B	18:20 PM	20:20 PM	BSB	CGH
80	Companhia B	17:52 PM	20:13 PM	THE	CGH
81	Companhia B	14:07 PM	16:34 PM	THE	GRU
82	Companhia A	14:41 PM	15:54 PM	CNF	GRU
83	Companhia A	15:41 PM	16:23 PM	CNF	GRU
84	Companhia A	14:30 PM	16:38 PM	SSA	GRU
85	Companhia A	15:00 PM	17:30 PM	GYN	CGH
86	Companhia A	14:17 PM	16:46 PM	REC	GRU
87	Companhia A	15:50 PM	17:17 PM	BSB	CGH
88	Companhia A	15:26 PM	16:45 PM	BSB	GRU
89	Companhia A	15:47 PM	17:41 PM	CNF	CGH
90	Companhia A	14:23 PM	16:56 PM	REC	CGH

91	Companhia A	14:10 PM	17:13 PM	REC	GRU
92	Companhia A	14:16 PM	17:22 PM	FOR	GRU
93	Companhia A	16:21 PM	17:57 PM	BSB	CGH
94	Companhia A	17:09 PM	17:53 PM	CNF	CGH
95	Companhia B	17:06 PM	18:14 PM	GYN	CGH
96	Companhia B	15:33 PM	18:35 PM	SSA	GRU
97	Companhia B	17:18 PM	18:20 PM	CNF	CGH
98	Companhia B	15:37 PM	19:21 PM	REC	GRU
99	Companhia B	16:51 PM	19:25 PM	SSA	GRU
100	Companhia B	18:16 PM	19:12 PM	CNF	CGH
101	Companhia B	17:33 PM	19:53 PM	BSB	CGH
102	Companhia B	15:40 PM	19:18 PM	FOR	GRU
103	Companhia B	16:44 PM	19:27 PM	REC	GRU
104	Companhia B	18:35 PM	19:39 PM	CNF	GRU
105	Companhia B	18:32 PM	19:53 PM	BSB	GRU
106	Companhia B	18:16 PM	19:57 PM	BSB	CGH
107	Companhia B	18:15 PM	20:03 PM	THE	CGH
108	Companhia B	13:36 PM	17:03 PM	THE	GRU
109	Companhia A	15:11 PM	16:31 PM	CNF	GRU
110	Companhia A	15:03 PM	16:41 PM	CNF	GRU
111	Companhia A	14:11 PM	16:52 PM	SSA	GRU
112	Companhia A	14:44 PM	17:19 PM	GYN	CGH
113	Companhia A	13:50 PM	16:40 PM	REC	GRU
114	Companhia A	15:42 PM	17:30 PM	BSB	CGH
115	Companhia A	15:12 PM	17:21 PM	BSB	GRU
116	Companhia A	16:06 PM	17:46 PM	CNF	CGH
117	Companhia A	14:11 PM	17:03 PM	REC	CGH
118	Companhia A	14:24 PM	17:31 PM	REC	GRU
119	Companhia A	14:11 PM	17:41 PM	FOR	GRU
120	Companhia A	16:18 PM	17:24 PM	BSB	CGH
121	Companhia A	16:17 PM	17:54 PM	CNF	CGH
122	Companhia B	17:16 PM	18:12 PM	GYN	CGH
123	Companhia B	16:00 PM	18:25 PM	SSA	GRU
124	Companhia B	17:39 PM	18:05 PM	CNF	CGH
125	Companhia B	15:30 PM	18:47 PM	REC	GRU

126	Companhia B	17:12 PM	19:17 PM	SSA	GRU
127	Companhia B	18:13 PM	19:02 PM	CNF	CGH
128	Companhia B	17:29 PM	19:18 PM	BSB	CGH
129	Companhia B	15:56 PM	19:20 PM	FOR	GRU
130	Companhia B	16:51 PM	19:40 PM	REC	GRU
131	Companhia B	18:30 PM	19:38 PM	CNF	GRU
132	Companhia B	18:06 PM	20:00 PM	BSB	GRU
133	Companhia B	18:07 PM	20:10 PM	BSB	CGH
134	Companhia B	18:29 PM	20:02 PM	THE	CGH
135	Companhia B	13:41 PM	16:46 PM	THE	GRU

Apêndice B

Voos Utilizados no Estudo de Caso Ordenados por IAT

A Tabela B.1 exemplifica a lista de voos ordenados por IAT, juntamente com os horários de EAT para cada voo.

Tabela B.1: Voos ordenados por IAT.

VOO	CIA_AEREA	ENT_FCA1	ENT_FCA2	IAT_FCA1	IAT_FCA2
28	Companhia A	15:09 PM	15:07 PM		15:07 PM
82	Companhia A	15:15 PM	15:17 PM	15:15 PM	
1	Companhia A	15:32 PM	15:24 PM		15:24 PM
56	Companhia A	15:33 PM	15:28 PM		15:28 PM
29	Companhia A	15:31 PM	15:35 PM	15:31 PM	
55	Companhia A	15:42 PM	15:36 PM		15:36 PM
83	Companhia A	15:41 PM	15:50 PM	15:41 PM	
81	Companhia B	16:03 PM	15:50 PM		15:50 PM
30	Companhia A	16:01 PM	15:53 PM		15:53 PM
109	Companhia A	15:55 PM	16:01 PM	15:55 PM	
113	Companhia A	15:56 PM	16:02 PM	15:56 PM	
57	Companhia A	16:06 PM	15:58 PM		15:58 PM
84	Companhia A	16:04 PM	15:58 PM		15:58 PM
88	Companhia A	16:07 PM	16:01 PM		16:01 PM
110	Companhia A	16:02 PM	16:06 PM	16:02 PM	
86	Companhia A	16:04 PM	16:09 PM	16:04 PM	
135	Companhia B	16:16 PM	16:04 PM		16:04 PM
31	Companhia A	16:10 PM	16:05 PM		16:05 PM

27	Companhia B	16:15 PM	16:06 PM		16:06 PM
3	Companhia A	16:18 PM	16:08 PM		16:08 PM
58	Companhia A	16:12 PM	16:08 PM		16:08 PM
111	Companhia A	16:09 PM	16:21 PM	16:09 PM	
2	Companhia A	16:14 PM	16:12 PM		16:12 PM
61	Companhia A	16:15 PM	16:12 PM		16:12 PM
90	Companhia A	16:22 PM	16:13 PM		16:13 PM
62	Companhia A	16:19 PM	16:18 PM		16:18 PM
117	Companhia A	16:19 PM	16:32 PM	16:19 PM	
108	Companhia B	16:20 PM	16:25 PM	16:20 PM	
5	Companhia A	16:23 PM	16:31 PM	16:23 PM	
6	Companhia A	16:25 PM	16:39 PM	16:25 PM	
35	Companhia A	16:26 PM	16:27 PM	16:26 PM	
64	Companhia A	16:34 PM	16:31 PM		16:31 PM
54	Companhia B	16:33 PM	16:37 PM	16:33 PM	
91	Companhia A	16:37 PM	16:34 PM		16:34 PM
9	Companhia A	16:36 PM	16:46 PM	16:36 PM	
87	Companhia A	16:42 PM	16:36 PM		16:36 PM
112	Companhia A	16:37 PM	16:49 PM	16:37 PM	
115	Companhia A	16:44 PM	16:38 PM		16:38 PM
92	Companhia A	16:49 PM	16:41 PM		16:41 PM
4	Companhia A	16:42 PM	16:48 PM	16:42 PM	
7	Companhia A	16:43 PM	16:49 PM	16:43 PM	
32	Companhia A	16:46 PM	16:56 PM	16:46 PM	
34	Companhia A	16:47 PM	16:46 PM		16:46 PM
59	Companhia A	16:46 PM	16:52 PM	16:46 PM	
85	Companhia A	16:48 PM	16:51 PM	16:48 PM	
114	Companhia A	16:56 PM	16:49 PM		16:49 PM
118	Companhia A	16:49 PM	16:50 PM	16:49 PM	
120	Companhia A	16:49 PM	16:52 PM	16:49 PM	
11	Companhia A	17:03 PM	16:53 PM		16:53 PM
13	Companhia A	16:54 PM	17:03 PM	16:54 PM	
33	Companhia A	17:01 PM	16:54 PM		16:54 PM
36	Companhia A	16:59 PM	16:56 PM		16:56 PM
63	Companhia A	17:01 PM	16:56 PM		16:56 PM

89	Companhia A	17:00 PM	16:58 PM		16:58 PM
65	Companhia A	17:02 PM	17:05 PM	17:02 PM	
38	Companhia A	17:07 PM	17:13 PM	17:07 PM	
119	Companhia A	17:11 PM	17:07 PM		17:07 PM
8	Companhia A	17:12 PM	17:08 PM		17:08 PM
60	Companhia A	17:10 PM	17:08 PM		17:08 PM
68	Companhia B	17:08 PM	17:12 PM	17:08 PM	
116	Companhia A	17:09 PM	17:13 PM	17:09 PM	
10	Companhia A	17:22 PM	17:11 PM		17:11 PM
121	Companhia A	17:15 PM	17:13 PM		17:13 PM
67	Companhia A	17:14 PM	17:19 PM	17:14 PM	
37	Companhia A	17:23 PM	17:16 PM		17:16 PM
39	Companhia A	17:16 PM	17:26 PM	17:16 PM	
14	Companhia B	17:18 PM	17:20 PM	17:18 PM	
94	Companhia A	17:18 PM	17:20 PM	17:18 PM	
93	Companhia A	17:22 PM	17:24 PM	17:22 PM	
66	Companhia A	17:25 PM	17:32 PM	17:25 PM	
124	Companhia B	17:25 PM	17:26 PM	17:25 PM	
15	Companhia B	17:31 PM	17:34 PM	17:31 PM	
40	Companhia A	17:33 PM	17:31 PM		17:31 PM
95	Companhia B	17:39 PM	17:31 PM		17:31 PM
122	Companhia B	17:31 PM	17:37 PM	17:31 PM	
12	Companhia A	17:35 PM	17:41 PM	17:35 PM	
69	Companhia B	17:39 PM	17:45 PM	17:39 PM	
41	Companhia B	17:52 PM	17:46 PM		17:46 PM
43	Companhia B	17:53 PM	17:47 PM		17:47 PM
97	Companhia B	17:47 PM	17:49 PM	17:47 PM	
123	Companhia B	17:55 PM	17:49 PM		17:49 PM
70	Companhia B	18:00 PM	17:59 PM		17:59 PM
16	Companhia B	18:00 PM	18:07 PM	18:00 PM	
96	Companhia B	18:02 PM	18:00 PM		18:00 PM
125	Companhia B	18:08 PM	18:05 PM		18:05 PM
42	Companhia B	18:08 PM	18:11 PM	18:08 PM	
17	Companhia B	18:17 PM	18:22 PM	18:17 PM	
71	Companhia B	18:23 PM	18:26 PM	18:23 PM	

127	Companhia B	18:23 PM	18:32 PM	18:23 PM	
49	Companhia B	18:28 PM	18:39 PM	18:28 PM	
126	Companhia B	18:33 PM	18:42 PM	18:33 PM	
102	Companhia B	18:36 PM	18:37 PM	18:36 PM	
129	Companhia B	18:36 PM	18:46 PM	18:36 PM	
128	Companhia B	18:45 PM	18:37 PM		18:37 PM
46	Companhia B	18:38 PM	18:41 PM	18:38 PM	
98	Companhia B	18:47 PM	18:38 PM		18:38 PM
100	Companhia B	18:42 PM	18:38 PM		18:38 PM
48	Companhia B	18:50 PM	18:41 PM		18:41 PM
99	Companhia B	18:52 PM	18:44 PM		18:44 PM
51	Companhia B	18:56 PM	18:45 PM		18:45 PM
103	Companhia B	18:48 PM	18:54 PM	18:48 PM	
26	Companhia B	18:53 PM	18:56 PM	18:53 PM	
73	Companhia B	18:54 PM	18:55 PM	18:54 PM	
104	Companhia B	18:55 PM	19:00 PM	18:55 PM	
44	Companhia B	18:57 PM	19:06 PM	18:57 PM	
131	Companhia B	19:05 PM	18:57 PM		18:57 PM
20	Companhia B	18:59 PM	19:09 PM	18:59 PM	
24	Companhia B	19:04 PM	18:59 PM		18:59 PM
47	Companhia B	18:59 PM	19:09 PM	18:59 PM	
74	Companhia B	19:02 PM	18:59 PM		18:59 PM
78	Companhia B	19:09 PM	19:02 PM		19:02 PM
19	Companhia B	19:15 PM	19:05 PM		19:05 PM
23	Companhia B	19:06 PM	19:08 PM	19:06 PM	
130	Companhia B	19:10 PM	19:06 PM		19:06 PM
76	Companhia B	19:07 PM	19:09 PM	19:07 PM	
22	Companhia B	19:08 PM	19:18 PM	19:08 PM	
72	Companhia B	19:10 PM	19:14 PM	19:10 PM	
101	Companhia B	19:10 PM	19:22 PM	19:10 PM	
18	Companhia B	19:12 PM	19:18 PM	19:12 PM	
45	Companhia B	19:12 PM	19:15 PM	19:12 PM	
21	Companhia B	19:13 PM	19:26 PM	19:13 PM	
105	Companhia B	19:22 PM	19:16 PM		19:16 PM
106	Companhia B	19:18 PM	19:23 PM	19:18 PM	

53	Companhia B	19:26 PM	19:19 PM		19:19 PM
107	Companhia B	19:31 PM	19:19 PM		19:19 PM
25	Companhia B	19:22 PM	19:24 PM	19:22 PM	
75	Companhia B	19:26 PM	19:23 PM		19:23 PM
132	Companhia B	19:23 PM	19:26 PM	19:23 PM	
134	Companhia B	19:23 PM	19:31 PM	19:23 PM	
80	Companhia B	19:30 PM	19:33 PM	19:30 PM	
77	Companhia B	19:31 PM	19:34 PM	19:31 PM	
133	Companhia B	19:33 PM	19:36 PM	19:33 PM	
50	Companhia B	19:35 PM	19:46 PM	19:35 PM	
52	Companhia B	19:38 PM	19:35 PM		19:35 PM
79	Companhia B	19:42 PM	19:47 PM	19:42 PM	

Apêndice C

Voos Não Alocados Utilizados no Estudo de Caso

A tabela C.1 apresenta os voos não alocados no estudo de caso, recebendo a classificação de *NOSLOT*.

Tabela C.1: Voos não alocados.

VOO	CIA_AEREA	ENT_FCA1	ENT_FCA2	FCA	SLOT
17	Companhia B	18:17 PM	18:22 PM	1	NOSLOT
33	Companhia A	17:01 PM	16:54 PM	1	NOSLOT
49	Companhia B	18:28 PM	18:39 PM	1	NOSLOT
65	Companhia A	17:02 PM	17:05 PM	1	NOSLOT
97	Companhia B	17:47 PM	17:49 PM	1	NOSLOT
129	Companhia B	18:36 PM	18:46 PM	1	NOSLOT
12	Companhia A	17:35 PM	17:41 PM	1	NOSLOT
44	Companhia B	18:57 PM	19:06 PM	1	NOSLOT
60	Companhia A	17:10 PM	17:08 PM	1	NOSLOT
76	Companhia B	19:07 PM	19:09 PM	1	NOSLOT
92	Companhia A	16:49 PM	16:41 PM	1	NOSLOT
124	Companhia B	17:25 PM	17:26 PM	1	NOSLOT
23	Companhia B	19:06 PM	19:08 PM	1	NOSLOT
39	Companhia A	17:16 PM	17:26 PM	1	NOSLOT
71	Companhia B	18:23 PM	18:26 PM	1	NOSLOT
87	Companhia A	16:42 PM	16:36 PM	1	NOSLOT
103	Companhia B	18:48 PM	18:54 PM	1	NOSLOT
119	Companhia A	17:11 PM	17:07 PM	1	NOSLOT

18	Companhia B	19:12 PM	19:18 PM	1	NOSLOT
34	Companhia A	16:47 PM	16:46 PM	1	NOSLOT
50	Companhia B	19:35 PM	19:46 PM	1	NOSLOT
66	Companhia A	17:25 PM	17:32 PM	1	NOSLOT
114	Companhia A	16:56 PM	16:49 PM	1	NOSLOT
130	Companhia B	19:10 PM	19:06 PM	1	NOSLOT
13	Companhia A	16:54 PM	17:03 PM	1	NOSLOT
45	Companhia B	19:12 PM	19:15 PM	1	NOSLOT
77	Companhia B	19:31 PM	19:34 PM	1	NOSLOT
93	Companhia A	17:22 PM	17:24 PM	1	NOSLOT
125	Companhia B	18:08 PM	18:05 PM	1	NOSLOT
8	Companhia A	17:12 PM	17:08 PM	1	NOSLOT
24	Companhia B	19:04 PM	18:59 PM	1	NOSLOT
40	Companhia A	17:33 PM	17:31 PM	1	NOSLOT
72	Companhia B	19:10 PM	19:14 PM	1	NOSLOT
104	Companhia B	18:55 PM	19:00 PM	1	NOSLOT
120	Companhia A	16:49 PM	16:52 PM	1	NOSLOT
19	Companhia B	19:15 PM	19:05 PM	1	NOSLOT
51	Companhia B	18:56 PM	18:45 PM	1	NOSLOT
67	Companhia A	17:14 PM	17:19 PM	1	NOSLOT
99	Companhia B	18:52 PM	18:44 PM	1	NOSLOT
115	Companhia A	16:44 PM	16:38 PM	1	NOSLOT
131	Companhia B	19:05 PM	18:57 PM	1	NOSLOT
14	Companhia B	17:18 PM	17:20 PM	1	NOSLOT
46	Companhia B	18:38 PM	18:41 PM	1	NOSLOT
78	Companhia B	19:09 PM	19:02 PM	1	NOSLOT
94	Companhia A	17:18 PM	17:20 PM	1	NOSLOT
126	Companhia B	18:33 PM	18:42 PM	1	NOSLOT
25	Companhia B	19:22 PM	19:24 PM	1	NOSLOT
41	Companhia B	17:52 PM	17:46 PM	1	NOSLOT
73	Companhia B	18:54 PM	18:55 PM	1	NOSLOT
89	Companhia A	17:00 PM	16:58 PM	1	NOSLOT
105	Companhia B	19:22 PM	19:16 PM	1	NOSLOT
121	Companhia A	17:15 PM	17:13 PM	1	NOSLOT
20	Companhia B	18:59 PM	19:09 PM	1	NOSLOT

36	Companhia A	16:59 PM	16:56 PM	1	NOSLOT
52	Companhia B	19:38 PM	19:35 PM	1	NOSLOT
68	Companhia B	17:08 PM	17:12 PM	1	NOSLOT
100	Companhia B	18:42 PM	18:38 PM	1	NOSLOT
116	Companhia A	17:09 PM	17:13 PM	1	NOSLOT
132	Companhia B	19:23 PM	19:26 PM	1	NOSLOT
15	Companhia B	17:31 PM	17:34 PM	1	NOSLOT
47	Companhia B	18:59 PM	19:09 PM	1	NOSLOT
63	Companhia A	17:01 PM	16:56 PM	1	NOSLOT
79	Companhia B	19:42 PM	19:47 PM	1	NOSLOT
95	Companhia B	17:39 PM	17:31 PM	1	NOSLOT
127	Companhia B	18:23 PM	18:32 PM	1	NOSLOT
10	Companhia A	17:22 PM	17:11 PM	1	NOSLOT
26	Companhia B	18:53 PM	18:56 PM	1	NOSLOT
42	Companhia B	18:08 PM	18:11 PM	1	NOSLOT
74	Companhia B	19:02 PM	18:59 PM	1	NOSLOT
106	Companhia B	19:18 PM	19:23 PM	1	NOSLOT
122	Companhia B	17:31 PM	17:37 PM	1	NOSLOT
21	Companhia B	19:13 PM	19:26 PM	1	NOSLOT
37	Companhia A	17:23 PM	17:16 PM	1	NOSLOT
53	Companhia B	19:26 PM	19:19 PM	1	NOSLOT
69	Companhia B	17:39 PM	17:45 PM	1	NOSLOT
101	Companhia B	19:10 PM	19:22 PM	1	NOSLOT
133	Companhia B	19:33 PM	19:36 PM	1	NOSLOT
16	Companhia B	18:00 PM	18:07 PM	1	NOSLOT
48	Companhia B	18:50 PM	18:41 PM	1	NOSLOT
80	Companhia B	19:30 PM	19:33 PM	1	NOSLOT
96	Companhia B	18:02 PM	18:00 PM	1	NOSLOT
11	Companhia A	17:03 PM	16:53 PM	1	NOSLOT
43	Companhia B	17:53 PM	17:47 PM	1	NOSLOT
75	Companhia B	19:26 PM	19:23 PM	1	NOSLOT
91	Companhia A	16:37 PM	16:34 PM	1	NOSLOT
107	Companhia B	19:31 PM	19:19 PM	1	NOSLOT
123	Companhia B	17:55 PM	17:49 PM	1	NOSLOT
22	Companhia B	19:08 PM	19:18 PM	1	NOSLOT

38	Companhia A	17:07 PM	17:13 PM	1	NOSLOT
70	Companhia B	18:00 PM	17:59 PM	1	NOSLOT
102	Companhia B	18:36 PM	18:37 PM	1	NOSLOT
118	Companhia A	16:49 PM	16:50 PM	1	NOSLOT
134	Companhia B	19:23 PM	19:31 PM	1	NOSLOT

Apêndice D

Atraso dos Voos Durante as Gerações

A tabela D.1 apresenta os atrasos dos voos e a quantidade de voos alocados durante as gerações do AG.

Tabela D.1: Atrasos e alocação dos voos durante as gerações.

GERAÇÃO	SLOTS ALOCADOS	SLOTS SEM VOOS	ATRASO GERAL	ATRASO CIA A	ATRASO CIA B
1	64	0	1629	754	875
2	64	0	1589	739	850
3	64	0	1537	783	754
4	64	0	1581	716	865
5	64	0	1518	687	831
6	64	0	1496	681	815
7	64	0	1491	700	791
8	64	0	1414	621	793
9	64	0	1474	641	833
10	64	0	1454	596	858
11	64	0	1482	629	853
12	64	0	1458	656	802
13	64	0	1452	643	809
14	64	0	1436	680	756
15	64	0	1413	655	758
16	64	0	1381	587	794
17	64	0	1372	632	740

18	64	0	1342	587	755
19	64	0	1279	593	686
20	64	0	1300	625	675
21	64	0	1287	633	654
22	64	0	1316	631	685
23	64	0	1352	682	670
24	64	0	1323	669	654
25	64	0	1313	628	685
26	64	0	1306	577	729
27	64	0	1286	637	649
28	64	0	1279	611	668
29	64	0	1273	644	629
30	64	0	1237	602	635
31	64	0	1226	590	636
32	64	0	1231	616	615
33	64	0	1237	648	589
34	64	0	1183	620	563
35	64	0	1180	622	558
36	64	0	1130	593	537
37	64	0	1153	555	598
38	64	0	1137	550	587
39	64	0	1078	539	539
40	64	0	1112	598	514
41	64	0	1205	712	493
42	64	0	1146	669	477
43	64	0	1097	639	458
44	64	0	1122	618	504
45	64	0	1111	649	462
46	64	0	1091	607	484
47	64	0	1088	625	463
48	64	0	1049	597	452
49	64	0	1041	645	396
50	64	0	1021	644	377
51	64	0	1003	591	412
52	64	0	988	601	387

53	64	0	976	599	377
54	64	0	949	587	362
55	64	0	897	563	334
56	64	0	877	493	384
57	64	0	840	505	335
58	64	0	813	511	302
59	64	0	806	459	347
60	64	0	786	512	274
61	64	0	766	503	263
62	64	0	743	493	250
63	64	0	910	611	299
64	64	0	911	643	268
65	64	0	891	626	265
66	64	0	907	604	303
67	64	0	892	619	273
68	64	0	888	581	307
69	64	0	852	586	266
70	64	0	903	635	268
71	64	0	824	639	185
72	64	0	845	565	280
73	64	0	818	582	236
74	64	0	813	563	250
75	64	0	774	567	207
76	64	0	706	509	197
77	64	0	663	447	216
78	64	0	625	446	179
79	64	0	617	423	194
80	63	1	575	427	148
81	63	1	576	400	176
82	62	2	534	355	179
83	62	2	494	378	116
84	61	3	457	333	124
85	61	3	422	303	119
86	61	3	427	215	212
87	61	3	449	257	192

88	61	3	479	237	242
89	61	3	424	250	174
90	61	3	439	188	251
91	61	3	413	200	213
92	60	4	422	222	200
93	59	5	393	193	200
94	59	5	400	169	231
95	58	6	415	222	193
96	58	6	386	198	188
97	57	7	324	127	197
98	56	8	303	141	162
99	55	9	351	124	227
100	55	9	324	147	177
101	55	9	294	132	162
102	54	10	280	137	143
103	54	10	311	129	182
104	55	9	353	119	234
105	54	10	369	173	196
106	54	10	345	166	179
107	54	10	306	140	166
108	53	11	313	161	152
109	53	11	334	185	149
110	53	11	308	176	132
111	53	11	293	163	130
112	53	11	318	184	134
113	53	11	305	200	105
114	52	12	332	216	116
115	52	12	309	204	105
116	52	12	283	177	106
117	52	12	270	171	99
118	52	12	296	205	91
119	52	12	278	200	78
120	51	13	296	233	63
121	52	12	291	255	36
122	51	13	322	272	50

123	51	13	307	259	48
124	51	13	313	290	23
125	51	13	328	282	46
126	51	13	315	271	44
127	51	13	312	270	42
128	51	13	327	289	38
129	51	13	308	287	21
130	51	13	308	278	30
131	50	14	336	302	34
132	50	14	291	257	34
133	50	14	309	277	32
134	50	14	287	257	30
135	50	14	263	233	30
136	50	14	305	275	30
137	50	14	296	269	27
138	50	14	257	230	27
139	50	14	222	197	25
140	50	14	227	206	21
141	50	14	198	177	21
142	48	16	210	198	12
143	48	16	236	196	40
144	48	16	222	184	38
145	48	16	217	178	39
146	47	17	202	170	32
147	48	16	227	164	63
148	48	16	211	153	58
149	48	16	191	141	50
150	48	16	188	130	58
151	48	16	176	120	56
152	48	16	166	105	61
153	48	16	153	94	59
154	48	16	139	84	55
155	47	17	121	70	51
156	45	19	133	86	47
157	45	19	140	112	28

158	45	19	115	74	41
159	45	19	123	100	23
160	45	19	118	93	25
161	44	20	136	113	23
162	44	20	114	81	33
163	44	20	137	108	29
164	44	20	126	95	31
165	44	20	119	91	28
166	44	20	153	148	5
167	44	20	141	134	7
168	44	20	128	121	7
169	44	20	144	137	7
170	44	20	138	131	7
171	44	20	134	127	7
172	44	20	126	119	7
173	44	20	133	128	5
174	44	20	129	124	5
175	44	20	123	118	5
176	44	20	119	114	5
177	44	20	104	99	5
178	44	20	112	107	5
179	44	20	116	111	5
180	44	20	116	111	5
181	43	21	129	124	5
182	43	21	128	123	5
183	43	21	121	116	5
184	43	21	119	114	5
185	43	21	117	112	5
186	43	21	116	111	5
187	43	21	115	110	5
188	43	21	111	106	5
189	42	22	113	108	5
190	42	22	108	103	5
191	42	22	104	99	5
192	42	22	104	99	5

193	42	22	100	95	5
194	42	22	100	95	5
195	42	22	106	101	5
196	42	22	97	92	5
197	42	22	89	84	5
198	42	22	81	76	5
199	42	22	77	72	5
200	42	22	73	68	5