

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UMA ABORDAGEM DE TOMADA DE DECISÃO
COLABORATIVA BASEADA EM JOGOS *SATISFICING*
PARA AEROPORTOS

CÍCERO ROBERTO FERREIRA DE ALMEIDA

ORIENTADOR: LI WEIGANG

TESE DE DOUTORADO EM
SISTEMAS MECATRÔNICOS

PUBLICAÇÃO: ENM.TD-08/14

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO - 2014

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

**UMA ABORDAGEM DE TOMADA DE DECISÃO
COLABORATIVA BASEADA EM JOGOS *SATISFICING*
PARA AEROPORTOS**

Cícero Roberto Ferreira de Almeida

Tese submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Sistemas Mecatrônicos.

Banca examinadora:

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

Prof[a]. Dr[a].Alba C. M. Alves de Melo (CIC/UnB)
Membro

Prof[a]. Dr[a].Yaeko Yamashita (ENC/UnB)
Membro

Prof. Dr.Alberto José Álvares (ENM/UnB)
Membro

Prof. Dr.Cláudio Jorge Alves Pinto (IEI/ITA)
Membro Externo

BRASÍLIA/DF, 11 DE SETEMBRO DE 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

ALMEIDA, CÍCERO ROBERTO FERREIRA DE

Uma Abordagem de Tomada de Decisão Colaborativa Baseada em Jogos *Satisficing* para Aeroportos / Cícero Roberto Ferreira de Almeida.

Brasília, 2014.

xvii, 146p., 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Sistemas Mecatrônicos, 2014)

Tese de doutorado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| 1. Teoria dos jogos. | 2. Jogos <i>Satisficing</i> . |
| 3. Decisões colaborativas. | 4. ATFM. |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, Cícero Roberto Ferreira de. (2014) Uma Abordagem de Tomada de Decisão Colaborativa Baseada em Jogos *Satisficing* para Aeroportos. Tese de doutorado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.TD-08/14, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 146p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cícero Roberto Ferreira de Almeida

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Uma Abordagem de Tomada de Decisão Colaborativa Baseada em Jogos *Satisficing* para Aeroportos.

GRAU / ANO: Doutor / 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Cícero Roberto Ferreira de Almeida
Universidade de Brasília - Brasília - Brasil
CEP 71.000-000 – cicero.almeida@gmail.com

DEDICATÓRIA

A meu pai, Manoel, pelas lições deixadas e pelo exemplo de humanidade e dedicação à família que sempre mostrou em vida.

A minha mãe, Rita, pelo amor e carinho em todos os momentos.

A minha esposa, Onília, pelo nosso amor que sempre foi de coração.

A meus filhos, Caio, Lucas e Amanda, por sua compreensão, amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas me apoiaram durante o curso e na conclusão desta pesquisa, pessoas a quem devo agradecimento e reconhecimento.

Aos amigos Alessandro Ferreira Leite e Antônio Carlos de Arruda Júnior pela ajuda nos seminários, trabalhos, exercícios e sugestões para melhoria deste trabalho.

À equipe do Destacamentos de Controle do Espaço Aéreo de Brasília DTCEA-BR especialmente aos colegas Hélio Fabeliano Lobato Cunha, Ricardo Lima Amaral e Pedro Antônio Pereira Miranda pela gentileza em indicar os caminhos para encontrar informações de cartas de aeródromo com áreas e vagas de estacionamentos de aviões.

Aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília e do Laboratório de Modelos Computacionais para Transporte Aéreo - TRANSLAB, em especial ao professor Li Weigang, por sua valiosa ajuda e empenho como orientador de doutorado, ao professor Edson Paulo da Silva pelo apoio quanto aos trâmites acadêmicos para a defesa deste trabalho e também às secretárias de Pós-Graduação, Simone Fontoura de Paula e Laiana Alves Guimarães de Almeida, pelo apoio incansável aos alunos.

A Deus por ter me concedido forças para seguir com esta pesquisa.

Muito obrigado a todos!

“Não é o conhecimento, mas o ato de aprender, não a posse mas o ato de chegar lá, que concede a maior satisfação.”

— CARL FRIEDRICH GAUSS

RESUMO

UMA ABORDAGEM DE TOMADA DE DECISÃO COLABORATIVA BASEADA EM JOGOS *SATISFICING* PARA AEROPORTOS

Autor: Cícero Roberto Ferreira de Almeida

Orientador: Li Weigang

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília-DF, 11 de setembro de 2014

Operações de pouso e decolagem em aeroportos estão sujeitas aos atrasos causados pelos procedimentos espera em solo (*Ground Delay Program - GDP*) e espera no ar (*Air Holding Problem - AHP*). Com isto, o paradigma *Collaborative Decision Making* (CDM) vem sendo empregado para elevar a eficiência do gerenciamento de tráfego aéreo, por envolver parceiros da comunidade aeronáutica. Esta tese de doutorado propõe uma metodologia baseada na Teoria dos Jogos *Satisficing* para contribuir na gestão da tomada de decisão colaborativa. A metodologia sugere decisões que envolvem as três principais entidades do cenário de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo, como o Gestor do Aeroporto, as Empresas Aéreas e o Gestor do Serviço de Controle de Tráfego Aéreo. O trabalho apresenta um modelo que descreve as funções de rejeitabilidade e seletibilidade, com base em equações de preferência das entidades. O modelo proposto, denominado Modelo *Satisficing* CDM, utiliza regras de segurança e sequenciamento de voos, e também algoritmos desenvolvidos para suporte a decisões colaborativas entre Gestor do Aeroporto, Empresa Aérea e Serviço ATC. Os testes empregaram uma base de dados de movimentos aéreos de pousos e decolagens na Área Terminal de São Paulo com dias de alto e baixo fluxo de tráfego no ano de 2009. Os dados do cenário real foram fornecidos pelo Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA). A análise de simulação com dados indica que a metodologia proposta nesta tese permite contribuir na gestão da tomada de decisão colaborativa por meio de sequências de pouso e decolagem de acordo com as preferências das entidades interessadas.

Palavras-Chave: Teoria dos Jogos Satisficing, CDM, ATFM, Rejeitabilidade, Seletibilidade

ABSTRACT

AN APPROACH TO COLLABORATIVE DECISION MAKING BASED ON SATISFICING GAMES FOR AIRPORTS

Autor: Cícero Roberto Ferreira de Almeida

Orientador: Li Weigang

Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos

Brasília-DF, 11 de setembro de 2014

Takeoff and landing operations at airports are subject to delays determined by the procedures of Ground Delay Program (GDP) and the solution of Air Holding Problem (AHP). Thus, the paradigm Collaborative Decision Making (CDM) has been employed as a methodology to increase the efficiency of air traffic management, by involving partners from the aviation community. This thesis proposes a model based on the Satisficing Game Theory to support collaborative decision in CDM environment. The model suggests decisions involving three main stakeholders in the scenario, such as the manager of the airport, the airlines and the air traffic control service. The thesis presents a model that describes the rejectability and selectability functions based on equations preferably entities. The proposed model, called Satisficing CDM Model, is developed as well with the rules and algorithms to support collaborative decisions between the manager of airport, airline and ATC control. The tests employed a database of air movements of takeoffs and landings in the terminal area of Sao Paulo in some days with high and low traffic flow in 2009. Data from the real scenario were provided by Brazilian Center for Management of Air Navigation (CGNA). The analysis of simulation data indicates that the proposed methodology in this research allows to contribute to the management of collaborative decision making through takeoff and landing sequences according the preferences of stakeholders.

Keywords: Satisficing Game Theory, CDM, ATFM, Rejectability, Selectability

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xvii
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Apresentação	18
1.2 Definição do Problema	19
1.3 Hipótese	20
1.4 Justificativa	20
1.5 Objetivos	22
1.6 Metodologia de pesquisa	22
1.7 Organização do Trabalho	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1 Apresentação	26
2.2 Teoria dos Jogos	26
2.2.1 Conceitos básicos	26
2.2.2 Classes de jogos	28
2.2.3 Modelagem formal de jogos	29
2.2.4 Equilíbrio de Nash	33
2.2.5 Ótimo de Pareto	34
2.3 Teoria dos Jogos <i>Satisficing</i>	34
2.3.1 Racionalidade	35
2.3.2 Praxiologia	36
2.3.3 Teoria da Utilidade Praxiológica	36

2.4	Sistemas Adaptativos Complexos	38
2.5	Tópicos conclusivos	39
3	O GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO AÉREO	40
3.1	Apresentação	40
3.2	O Serviço de Gerenciamento de Tráfego Aéreo	40
3.2.1	Medidas restritivas de fluxo	41
3.2.2	Estrutura do espaço aéreo	42
3.2.3	A infraestrutura aeroportuária	44
3.3	Soluções com otimização individual de entidades	46
3.3.1	Pesquisas Direcionadas para o ATM/ATC	46
3.3.2	Pesquisas Direcionadas para o Aeroporto	50
3.3.3	Pesquisas Direcionadas para Empresas Aéreas	53
3.3.4	Pesquisas em Jogos <i>Satisficing</i>	56
3.4	Funções de Preferência das Entidades	67
3.4.1	Funções de Preferências para Controle de Tráfego Aéreo	67
3.4.2	Funções de Preferências para Empresas Aéreas	69
3.4.3	Funções de Preferências para Aeroportos	70
3.5	Tópicos conclusivos	71
4	METODOLOGIA DE GESTÃO DA TOMADA DE DECISÃO	72
4.1	Apresentação	72
4.2	Etapa 1 - Mapear e definir as funções de preferência	72
4.3	Etapa 2 - Definição dos tipos de decisão	72
4.4	Etapa 3 - Elaborar Modelo <i>Satisficing</i>	74
4.5	Etapa 4 - Definição das políticas de prioridade por tipo de operação e entidade	81
4.6	Etapa 5 - Definição de regras	81

4.6.1	Regras de Segurança	81
4.6.2	Regras de Sequenciamento GDP	82
4.6.3	Regras de Sequenciamento AHP	84
4.7	Etapa 6 - Identificar todas as opções de decisão	85
4.8	Etapa 7 - Desenvolvimento do protótipo	85
4.9	Etapa 8 - Tomada de decisão	86
4.9.1	Tomada de decisão GDP	86
4.9.2	Tomada de decisão AHP	87
4.10	Tópicos conclusivos	88
5	TOMADA DE DECISÃO EM AEROPORTOS DA TMA-SP	89
5.1	Apresentação	89
5.2	Descrição de Cenários e Dados	89
5.3	Planejamento de Estudo de Caso	91
5.4	Decisões GDP em Cenário de Alto Fluxo	91
5.5	Decisões AHP em Cenário de Alto Fluxo	93
5.6	Decisões GDP em Cenário de Baixo Fluxo	95
5.7	Decisões AHP em Cenário de Baixo Fluxo	97
5.8	Decisões AHP e GDP com Alteração de <i>Índice de Cautela</i>	99
5.8.1	Decisões GDP em alto fluxo com <i>Índice de Cautela</i>	99
5.8.2	Decisões AHP em alto fluxo com <i>Índice de Cautela</i>	100
5.8.3	Decisões GDP em baixo fluxo com <i>Índice de Cautela</i>	100
5.8.4	Decisões AHP em baixo fluxo com <i>Índice de Cautela</i>	101
5.9	Tópicos conclusivos	101
6	ANÁLISE DE RESULTADOS	103
6.1	Apresentação	103

6.2	Análise de resultados sem <i>índice de cautela</i>	103
6.2.1	Caso 1: Decisões GDP em alto fluxo	103
6.2.2	Caso 2: Decisões AHP em alto fluxo	105
6.2.3	Caso 3: Decisões GDP em baixo fluxo	106
6.2.4	Caso 4: Decisões AHP em baixo fluxo	106
6.3	Análise do <i>índice de cautela</i>	107
6.3.1	Caso 1: Decisões GDP em alto fluxo com <i>índice de cautela</i>	107
6.3.2	Caso 2: Decisões AHP em alto fluxo com <i>índice de cautela</i>	108
6.3.3	Caso 3: Decisões GDP em baixo fluxo com <i>índice de cautela</i>	109
6.3.4	Caso 4: Decisões AHP em baixo fluxo com <i>índice de cautela</i>	109
6.4	Tópicos conclusivos	109
7	CONCLUSÕES	112
7.1	Apresentação	112
7.2	Avaliação da Metodologia desenvolvida	113
7.2.1	Aspectos positivos	113
7.2.2	Aspectos a aprimorar	113
7.3	Comparação com outras metodologias	114
7.4	Contribuições	115
7.5	Considerações finais e trabalhos futuros	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
	ANEXOS	126
	ANEXO A – ALGORITMOS	127
A.1	Apresentação	127
A.1.1	Algoritmo de rejeitabilidade	127

A.1.2	Algoritmo de seletibilidade	129
A.1.3	Algoritmo <i>Satisficing</i>	129
ANEXO B – PROJETO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL		130
B.1	Apresentação	130
B.1.1	Arquitetura do protótipo <i>SatisficingCDM</i>	130
B.1.2	Padrão de nomenclatura de classes e atributos	130
B.2	Submódulos	131
B.2.1	Submódulo <i>EntitiesPreferenceSM</i>	131
B.2.2	Submódulo <i>SatisficingSM</i>	131
B.2.3	Submódulo <i>DecisionSupportSM</i>	131
B.2.4	Submódulo <i>DataPersistenceSM</i>	132
B.3	Interação entre os Módulos	132
B.4	Implementação do Protótipo	132
ANEXO C – CARTAS DE ESTACIONAMENTO DE AERÓDROMO DE GUARULHOS		137
C.1	Apresentação	137
ANEXO D – CARTA DE ESTACIONAMENTO DE AERÓDROMO DE CONGONHAS		144
D.1	Apresentação	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Dilema dos Prisioneiros - resultados do jogo.	32
Tabela 2.2 –	Dilema dos Prisioneiros - Matriz de <i>payoff</i>	32
Tabela 2.3 –	Caça ao Cervo (<i>Stag-Hunt</i>)- Matriz de <i>payoff</i>	33
Tabela 3.1 –	Regiões de Informação de Voo do Brasil e órgãos controladores	43
Tabela 3.2 –	Tipo de Aeródromos Brasileiros - Fonte: (ANAC, 2012)	45
Tabela 3.3 –	Trabalhos e abordagens constantes no Estado da Arte	47
Tabela 3.4 –	Trabalhos que empregam abordagem em Jogos <i>Satisficing</i>	56
Tabela 5.1 –	Aeronaves no solo de Guarulhos (SBGR)	91
Tabela 5.2 –	Aeronaves no solo de Congonhas (SBSP)	92
Tabela 5.3 –	Ordem satisfatória de decolagem em alto fluxo	93
Tabela 5.4 –	Aeronaves em espera no ar com destino a Guarulhos (SBGR)	94
Tabela 5.5 –	Aeronaves em espera no ar com destino a Congonhas (SBSP)	95
Tabela 5.6 –	Ordem satisfatória de pouso em alto fluxo	96
Tabela 5.7 –	Aeronaves no solo de Guarulhos (SBGR)	96
Tabela 5.8 –	Aeronaves no solo de Congonhas (SBSP)	97
Tabela 5.9 –	Ordem satisfatória de decolagem em baixo fluxo	97
Tabela 5.10 –	Aeronaves em espera no ar com destino a Guarulhos(SBGR)	97
Tabela 5.11 –	Aeronaves em espera no ar com destino a Congonhas (SBSP)	98
Tabela 5.12 –	Ordem satisfatória de pouso em baixo fluxo	98
Tabela 5.13 –	Ordem satisfatória de decolagem em alto fluxo com <i>Índice de Cautela</i> $q_L = 0,8$	99
Tabela 5.14 –	Ordem satisfatória de pouso em alto fluxo com <i>Índice de Cautela</i> $q_L = 0,8$	100
Tabela 5.15 –	Ordem de pouso satisfatória que atende aos participantes do CDM .	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Modelo Compartimentado e CDM - Fonte: (BRASIL, 2013).	21
Figura 1.2 –	Estrutura da metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa	23
Figura 3.1 –	Regiões de Informação de Voo.	43
Figura 3.2 –	Estrutura de uma Área Terminal - TMA. Fonte Bastos e Baum (2007).	44
Figura 3.3 –	Espaço aéreo controlado. TMA e aerovias. Fonte Rolim, Portela e Alves (2004).	45
Figura 3.4 –	Exemplo de grafo fluxo de influência para determinar a seletibilidade - Fonte: (ARCHIBALD <i>et al.</i> , 2008).	63
Figura 4.1 –	Metodologia proposta para contribuir na gestão da tomada de decisão	73
Figura 4.2 –	Modelo <i>Satisficing</i> CDM.	75
Figura 4.3 –	Procedimento de tomada de decisão GDP	86
Figura 4.4 –	Procedimento para tomada de decisão AHP.	87
Figura 5.1 –	TMA-SP e seus aeroportos. Fonte: (FRAGA, 2009)	90
Figura B.1 –	Arquitetura do Protótipo <i>SatisficingCDM</i>	132
Figura B.2 –	Estrutura de pacotes do Protótipo <i>SatisficingCDM</i>	133
Figura B.3 –	Diagrama de Classes do Protótipo <i>SatisficingCDM</i>	134
Figura B.4 –	Tela inicial do protótipo <i>SatisficingCDM</i>	134
Figura B.5 –	Saída das rejeitabilidades e seletibilidade para decisões GDP.	135
Figura B.6 –	Tela de sugestão de sequência de pouso.	135
Figura B.7 –	Modelo de dados do Protótipo <i>SatisficingCDM</i>	136
Figura C.1 –	Carta de Estacionamento 1 de Guarulhos	138
Figura C.2 –	Carta de Estacionamento 1 de Guarulhos - Informações complemen- tares	139
Figura C.3 –	Carta de Estacionamento 2 de Guarulhos	140

Figura C.4 – Carta de Estacionamento 2 de Guarulhos - Informações complementares	141
Figura C.5 – Carta de Estacionamento 3 de Guarulhos	142
Figura C.6 – Carta de Estacionamento 3 de Guarulhos - Informações complementares	143
Figura D.1 – Carta de Estacionamento de Congonhas	145
Figura D.2 – Carta de Estacionamento de Congonhas - Informações complementares	146

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	Problema de Espera no Ar (<i>Airbone Holding Problem</i>).
ASM	Gerenciamento do Espaço Aéreo (<i>Air Space Management</i>);
ATC	Controle de Tráfego Aéreo (<i>Air Traffic Control</i>).
ATFM	Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (<i>Air Traffic Flow Management</i>).
ATM	Gerenciamento de Tráfego Aéreo (<i>Air Traffic Management</i>).
ATFSM-MAS	Sistema Multi-agentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (<i>Air Traffic Flow Synchronization and Management Multi-Agents System</i>).
CDM	Processo de Tomada de Decisões Colaborativas (<i>Collaborative Decision Making</i>).
CINDACTA I	Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo.
CGNA	Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea.
FAA	Administração Federal de Aviação (<i>Federal Aviation Administration</i>).
FCFS	<i>First-Come/First-Served</i> - <i>FCFS</i> - Primeiro a Chegar/Primeiro a Servir
FIR	Região de Informação de Voo (<i>Flight Information Region</i>).
GDP	Programa de Atraso em Solo (<i>Ground Delay Program</i>).
GHP	Problema de Espera em Solo (<i>Ground Holding Problem</i>).
ICAO	Organização Internacional da Aviação Civil <i>International Civil Aviation Organization</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
SISCONFLUX	Sistema de Apoio à Decisão aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego.
TMA	Área Terminal (<i>Terminal Manoeuvring Area</i>)
TMA-SP	Área Terminal de São Paulo

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O crescimento do movimento de aeronaves e passageiros nos aeroportos no Brasil e também no mundo tem sido constante na última década. Os dados do Movimento Operacional Acumulado da Rede INFRAERO de 2003 a 2014 (INFRAERO, 2014) confirmam este incremento. Este aumento do fluxo de aeronaves no espaço aéreo e aeroportos impulsiona a adoção de metodologias de apoio à tomada de decisões, no sentido de garantir um desempenho que satisfaça às preferências das entidades envolvidas no cenário de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management - ATFM*), como gestores dos aeroportos, empresas aéreas e unidades de controle de tráfego aéreo.

As partes interessadas precisam tomar decisões para garantir a fluidez segura do tráfego de aeronaves, bem como proporcionar conforto e celeridade na prestação de serviços ao passageiro e demais usuários do sistema de transporte aéreo. Estas preocupações com a eficiência global do sistema têm impulsionado a comunidade do setor aéreo, em especial, as autoridades do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), a buscar abordagens para contribuir na adoção do paradigma *Collaborative Decision Making* (CDM) com maior colaboração entre as partes interessadas.

Neste contexto, destacam-se três principais classes de entidades interessadas que atuam no cenário ATFM: O Gestor do Aeroporto, as Empresas Aéreas (companhias) e o Serviço de Controle de Tráfego Aéreo (NORIN, 2008). Estas entidades tomam decisões com o objetivo de aumentar sua eficiência individual, no entanto, os efeitos destas decisões baseadas em comportamento individualista podem repercutir na eficiência das outras entidades.

Cenários com esta natureza, onde múltiplas entidades tomam decisões com efeitos que repercutem em outras entidades, podem ser analisados tal qual um jogo, onde cada entidade é vista como um jogador.

A Teoria dos Jogos não Cooperativos estabelecida por Neumann e Morgenstern (1944) analisa as interações existentes em ambiente com múltiplos jogadores, onde cada indivíduo busca maximizar o seu ganho, ou utilidade individual. Em jogos não cooperativos, cada jogador considera as suas preferências individuais sem preocupações com as preferências dos demais jogadores do ambiente. Portanto, o jogador pode ser entendido como um ente de comportamento individualista.

Por outro lado, a Teoria dos Jogos *Satisficing* (STIRLING, 2003) é uma metodologia que emprega um conceito de solução suplementar à Teoria dos Jogos não Cooperativos. Soluções *satisficing* buscam o desempenho satisfatório individual do jogador, mas também consideram o desempenho satisfatório do grupo onde este jogador se insere (XIAOHUI; XUEJUN; XIANGMIN, 2012).

O comportamento individualista das entidades do cenário aéreo possivelmente produz conflitos que eventualmente geram atrasos, consumo extra de combustível, emissão excessiva de poluentes e congestionamentos do espaço aéreo. Isto pode levar à sobrecarga de recursos de infraestrutura aeronáutica, aeroportuária, de pessoal e impactos no consumo demasiado de recursos financeiros.

Cada uma destas entidades possui objetivos distintos e para atingi-los, tomam decisões com vista a obter a solução ótima para seu desempenho individual, desconsiderando inicialmente os efeitos de suas decisões sobre as demais entidades. Por esta visão, o cenário de fluxo aéreo poderia ser modelado, em princípio, como um jogo não-cooperativo entre estas três entidades, ou jogadores. No entanto, considerando que o individualismo dos jogadores é inadequado para o cenário de tráfego aéreo (ARCHIBALD *et al.*, 2008), por razões de segurança, custo e eficiência do fluxo de tráfego, estas entidades são eventualmente compelidas a negociar, ou melhor, colaborar.

Esta tese de doutorado apresenta uma metodologia para contribuir na gestão da tomada de decisão baseada na Teoria dos Jogos *Satisficing*, levando em consideração os interesses de três principais classes de entidades decisoras do cenário aéreo: o Gestor do Aeroporto, as Empresas Aéreas e o Serviço de Controle de Tráfego Aéreo.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

No Brasil, a tomada de decisão em relação a espera no ar e no solo se dá pelo Serviço de Controle de Tráfego Aéreo (Serviço ATC), atendendo o interesse de apenas uma entidade, entretanto para realizar esta operação de CDM é necessário considerar as demais entidades como as empresas aéreas e os gestores de aeroportos, uma vez que existem conflitos de interesse entre estas três entidades, considerando que os operadores de empresas aéreas desejam maximizar os lucros, os gestores de aeroportos desejam mais movimentação de passageiros e aeronaves e o Serviço ATC deseja a segurança máxima. No entanto, verifica-se a existência de um interesse comum que é a fluidez segura do tráfego aéreo.

Principalmente para aeroportos com grandes movimentações, é importante que as decisões sejam tomadas de forma colaborativa, tentando atender os interesses de cada

uma das entidades.

Países como Estados Unidos e os da Europa utilizam o compartilhamento de informações para tomada de decisão em procedimentos de espera no ar (AHP - *Air Holding Problem*) e espera em solo (GDP - *Ground Delay Program*), considerando a incorporação de duas entidades que são Serviço ATC e as Empresas Aéreas.

Assim, para a realidade brasileira, o desafio que fica é: Como aprimorar a gestão da tomada de decisão do Serviço ATC em relação a procedimentos AHP e GDP, levando em consideração os interesses de três entidades para melhorar a fluidez e a segurança da movimentação de aeronaves?

1.3 HIPÓTESE

A contribuição na gestão da tomada de decisão da entidade Serviço ATC se dá baseada no grau de aceitação (*selectability*) e rejeição (*rejectability*) das três entidades envolvidas nas operações AHP e GDP, fundamentado na Teoria dos Jogos *Satisficing* afim de melhorar a fluidez e a segurança da movimentação aérea.

1.4 JUSTIFICATIVA

Em muitos problemas complexos, por vezes, a solução requer a elaboração de um modelo para obter, conforme afirmam [Kelton, Sadowski e Sturrock \(2004\)](#), aproximações quantitativas e estruturais e também suposições de como funciona o sistema real de modo que se possa ter uma representação mais simples de uma realidade.

No contexto ATFM, as decisões individualistas das entidades podem reduzir o desempenho global do sistema. Deste modo, a cooperação é importante na obtenção de um ganho global, com vista a se buscar uma *utilidade social* no lugar de uma *utilidade individual* para cada jogador. Esta utilidade social pode ser alcançada por um fluxo de tráfego aéreo satisfatório para as três categorias de entidades. Um fluxo aéreo satisfatório seria um fluxo de tráfego balanceado para se ajustar às capacidades que cada entidade tem em absorvê-lo, de modo a promover redução da sobrecarga de trabalho dos profissionais envolvidos, redução dos congestionamentos da infraestrutura aeronáutica, aeroportuária e redução dos custos operacionais. Deste modo, a Teoria dos Jogos *Satisficing* mostra-se como uma alternativa à Teoria dos Jogos não Cooperativos na elaboração de uma metodologia para aprimorar a tomada de decisão colaborativa afim de implementar este fluxo adequado.

As pesquisas em ATFM propõem metodologias diversas para tratar o desempenho das entidades do cenário aéreo, por exemplo sistemas multiagentes, programação inteira, fluxo em rede, algoritmos de fluxo máximo entre outras abordagens. No entanto, parece haver uma tendência em tratar separadamente os problemas de otimização de cada participante do cenário de fluxo aéreo, sem considerar o desempenho global do sistema de fluxo de tráfego. Nota-se portanto, uma lacuna de pesquisas que abordem o grau de interdependência de decisões das entidades envolvidas no cenário ATFM, bem como a repercussão dos impactos de decisões individuais nas demais entidades do contexto.

O emprego exclusivo de processos e metodologias de otimização local conduz, possivelmente, a um reduzido nível global de gerenciamento inteligente do sistema e isto pode oferecer riscos à segurança, elevação de custos e atrasos no sistema em nível global.

Esta visão da colaboratividade no cenário ATFM já mobiliza a comunidade aérea e autoridades brasileiras do setor que buscam modelos de suporte à tomada de decisão colaborativa entre as três principais classes de entidades do cenário aéreo. Conforme destaca o CGNA, o objetivo consiste em migrar do modelo de decisões em nível individual das entidades, ou decisões “compartimentadas”, para o processo de decisões colaborativas, segundo o paradigma CDM, de modo a envolver aeroportos, empresas aéreas e serviço ATC sob coordenação do CGNA (BRASIL, 2013). A Figura 1.1 destaca esta necessidade brasileira observada pelas autoridades do setor que foram levantadas pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo do Comando da Aeronáutica (DECEA).

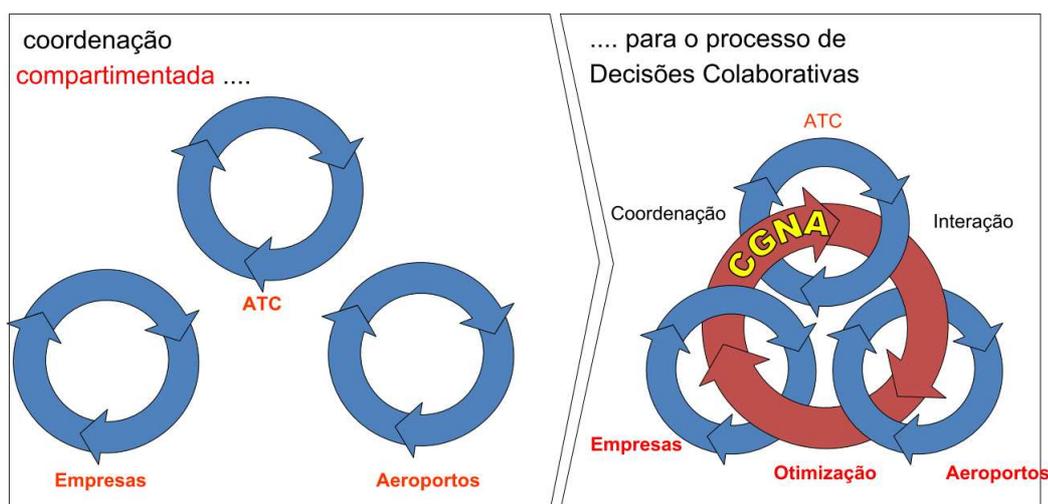


Figura 1.1 – Modelo Compartimentado e CDM - Fonte: (BRASIL, 2013).

Com base nestes conceitos, é possível perceber a relevância na busca de soluções onde as entidades colaborem entre si para um desempenho satisfatório em nível global do sistema.

1.5 OBJETIVOS

O objetivo geral desta tese de doutorado é desenvolver uma metodologia para contribuir na gestão de tomada de decisão colaborativa da entidade Serviço ATC baseada no grau de aceitação (*selectability*) e rejeição (*rejectability*) das três entidades envolvidas nas operações AHP e GDP fundamentada na Teoria dos Jogos *Satisficing* afim de melhorar a fluidez e segurança do movimento aéreo.

Para atingir o objetivo geral desta pesquisa, foi necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Mapear e selecionar as preferências de cada entidade participante do CDM: Gestor do Aeroporto, Empresas Aéreas e Serviço ATC;
- Desenvolvimento de funções de rejeitabilidade e seletibilidade para cada parceiro dentro do CDM;
- Estabelecer um *framework* de definição de regras, procedimentos e políticas envolvidas no mecanismo CDM;
- Projetar e desenvolver protótipo com o mecanismo de CDM que envolva o parceiro Aeroporto na tomada de decisão colaborativa com Empresas Aéreas e Serviço ATC;
- Testar e validar a metodologia por meio de estudo de caso com dados reais de movimentos aéreos.

Em aproveitamento desta pesquisa para atender aos requisitos do curso de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos em nível de doutorado, os resultados preliminares e intermediários do trabalho desenvolvido foram divulgados em congressos nacionais e internacionais.

1.6 METODOLOGIA DE PESQUISA

A abordagem metodológica adotada nesta pesquisa é a hipotético dedutiva, onde a partir da hipótese se desenvolve a pesquisa na tentativa de comprová-la. Como método de procedimento, foi desenvolvida uma pesquisa descritiva com coleta de dados e projeto e desenvolvimento de protótipo computacional para estudo de caso. O estudo de caso possibilita avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta. Para atingir os objetivos da pesquisa, foram seguidas algumas etapas apresentadas de forma sistematizada na Figura 1.2.

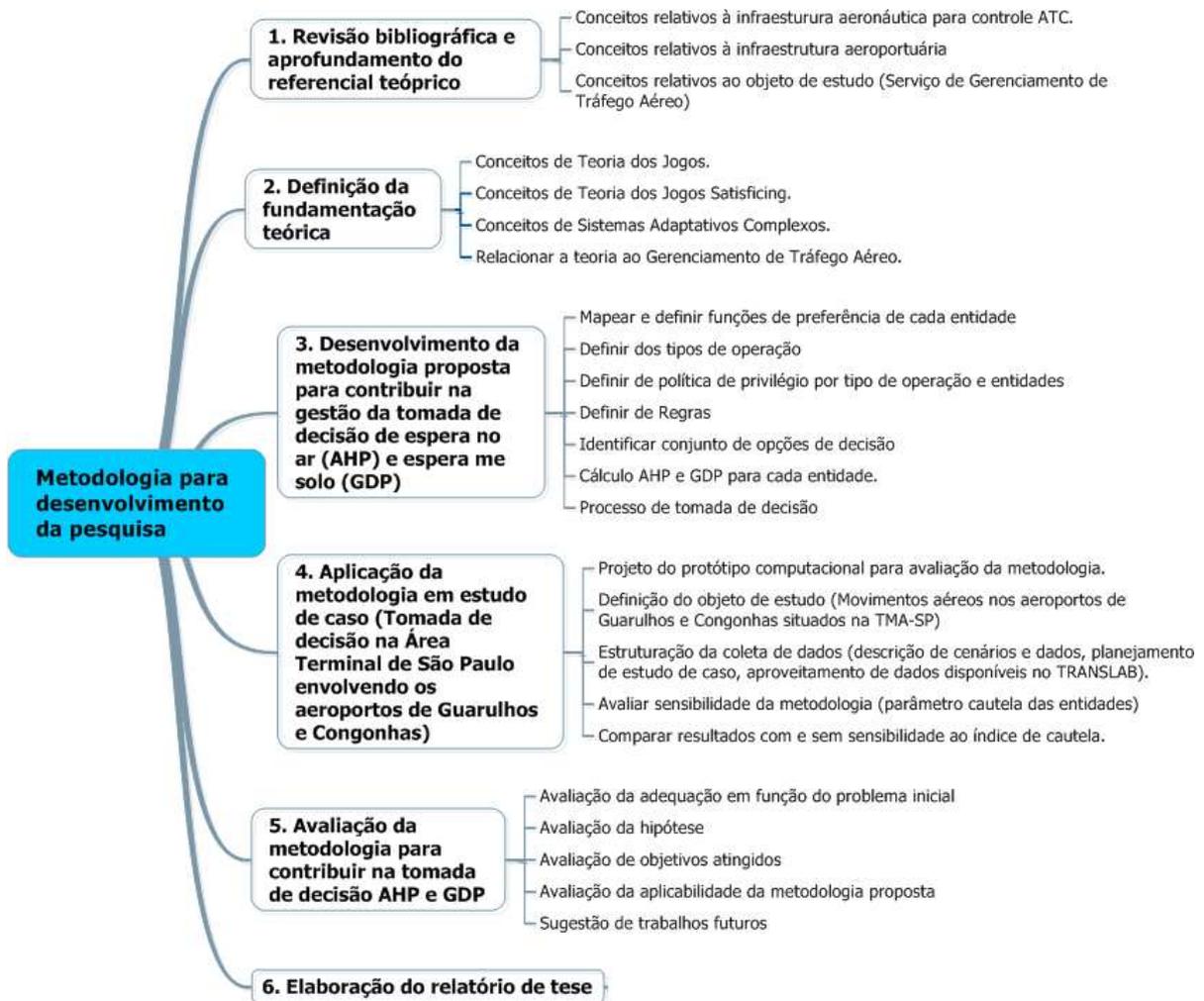


Figura 1.2 – Estrutura da metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa

Etapa 1 - Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica se deu por meio de consultas a manuais e obras de autores relevantes para levantar os conceitos envolvidos em Gerenciamento de Tráfego Aéreo e infraestrutura aeroportuária com vista a identificar os recursos, os elementos que compõem cada infraestrutura e os processos atualmente empregados para gerenciar o fluxo de tráfego aéreo.

Etapa 2 - Fundamentação Teórica

A revisão bibliográfica forneceu subsídios para estabelecer os conceitos a serem empregados com respeito ao Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (objeto do estudo), no que se refere a medidas restritivas de fluxo de tráfego, entre elas as medidas de espera em solo (*Ground Delay Program - GDP*) e espera no ar (*Air Holding Problem - AHP*). A revisão permitiu também verificar que a decisão de aplicação destas medidas são realizadas unilateralmente pela entidade Serviço ATC, sem colaboratividade com as outras

entidades. Deste modo, para desenvolver uma metodologia para contribuir na gestão da tomada de decisão colaborativa pela entidade Serviço ATC, a fundamentação teórica concentrou-se nos conceitos de teorias que possam modelar ambientes onde existe conflito e cooperação entre tomadores de decisão, funções que retornam valores de aceitação (*selectability*) e rejeição (*rejectability*) a decisões e também imprevisibilidade de cenários. Portanto, a Teoria dos Jogos, a Teoria dos Jogos *Satisficing* e a Teoria de Sistemas Adaptativos Complexos foram elencadas para compor a fundamentação teórica deste trabalho.

Etapa 3 - Desenvolvimento da metodologia proposta para contribuir na gestão da tomada de decisão de espera no ar (AHP) e espera me solo (GDP)

Nesta etapa, foi desenvolvida a metodologia, onde se considerou as etapas envolvidas na melhoria da gestão da tomada de decisão pelo Serviço ATC. Esta metodologia envolve as etapas de mapeamento e definição de funções de preferências de cada entidade; a definição dos tipos de operações envolvidas (AHP ou GDP); a definição de políticas de prioridade de decisão para cada entidade, por tipo de operação; definição de regras de segurança para decisões AHP e GDP e regras de sequenciamento de voos, conforme a utilidade da decisão, que é calculada pela diferença entre valores de rejeição e aceitação de uma decisão AHP ou GDP; identificação do conjunto de opções de decisão disponíveis; cálculo de valores para ordenamento de decisões conforme a interseção entre as entidades envolvidas e por fim a estruturação do processo de tomada de decisão.

Etapa 4 - Estudo de caso para verificar a validade da metodologia proposta de tomada de decisão

Nesta etapa, a metodologia proposta foi aplicada em um estudo de caso para validar suas etapas no processo de melhoria da gestão da tomada de decisão pelo Serviço ATC. O objeto escolhido foi o fluxo de movimentação aérea nos aeroportos de Guarulhos e Congonhas, ambos situados na Área Terminal de São Paulo (TMA-SP).

Etapa 5 - Análise e avaliação da metodologia

Nesta etapa, foi realizada a avaliação da aplicação da metodologia proposta com relação ao objetivo inicial quanto à possibilidade de aprimorar a gestão da tomada de decisão colaborativa da entidade Serviço ATC baseada no grau de aceitação e e rejeição das três entidades envolvidas nas operações AHP e GDP.

Etapa 6 - Elaboração do relatório de tese

1.7 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta os principais conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. São abordados conceitos básicos de Teoria dos Jogos, Equilíbrio de Nash, Ótimo de Pareto; Teoria dos Jogos *Satisficing* e Sistemas Adaptativos Complexos.

O capítulo 3 contextualiza o cenário aéreo brasileiro, apresentando o Serviço de Gerenciamento de Tráfego Aéreo, a infraestrutura do espaço aéreo e infraestrutura aeronáutica, as soluções já implementadas para otimização individual das entidades participantes do cenário, o levantamento de trabalhos em jogos *satisficing* e o mapeamento e seleção das funções de preferência.

O capítulo 4 apresenta a Metodologia para contribuir na gestão da tomada de decisão e descreve as suas oito etapas: Mapear e definir as funções de preferência, Definição dos tipos de operação, Elaborar Modelo *Satisficing*, Definição de políticas de prioridade por tipo de operação e entidade, Definição de regras, Identificar todas as opções de decisão, Desenvolvimento do protótipo e Tomada de Decisão.

O capítulo 5 apresenta um estudo de caso de Tomada de Decisão para Aeroportos da Área Terminal de São Paulo (TMA-SP) em ambiente CDM com os resultados gerados pela metodologia proposta aplicada a cenários de alto e baixo fluxo de movimentos aéreos em decisões GDP e AHP.

O capítulo 6 mostra a análise dos resultados obtidos no capítulo 5 com relação aos casos de decisões GDP em alto fluxo, AHP em alto fluxo, GDP em baixo fluxo e AHP em baixo fluxo, além de apresentar a análise destes casos com alteração do *índice de Cautela*.

O capítulo 7 traz as conclusões do trabalho quanto aos objetivos alcançados, a avaliação da metodologia desenvolvida, a comparação com outras metodologias, as contribuições científicas e a agenda de pesquisa e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo descreve os fundamentos teóricos da pesquisa, que compreendem Teoria dos Jogos, Teoria dos Jogos *Satisficing* e Sistemas Adaptativos Complexos. Os conceitos destas teorias são importantes porque os elementos estruturantes e entidades envolvidas no ambiente ATFM podem atuar como jogadores que buscam decisões satisfatórias para o desempenho individual e de grupo, além disto, globalmente, este ambiente parece convergir para um comportamento emergente que é a fluidez segura do tráfego de aeronaves.

2.2 TEORIA DOS JOGOS

Os princípios da Teoria dos Jogos surgiram com a publicação da obra do matemático economista Antoine Augustin Cournot intitulada “*Researches into the Mathematical Principles of the Theory of Wealth*” (COURNOT, 1897). Embora Cournot (1897) tenha lançado bases teóricas, a Teoria dos Jogos somente se estabeleceu como um campo científico a partir das pesquisas de John Von Neumann e Oskar Morgenstern que, em 1944, publicaram o trabalho “*The Theory of Games and Economics Behavior*” (NEUMANN; MORGENSTERN, 1944). Neste trabalho, os pesquisadores empregaram pela primeira vez um modelo matemático para captar o comportamento em um ambiente estratégico, onde o êxito das decisões de um jogador depende das decisões tomadas por outros jogadores. A partir deste trabalho seminal, a Teoria dos Jogos vem evoluindo e atualmente seus conceitos podem ser aplicados em Biologia, Economia, Ciências Sociais, Ciências Políticas, Ciência da Computação dentre outros ramos do conhecimento.

A Teoria dos Jogos pode ser conceituada como o estudo de modelos matemáticos de conflito e cooperação entre tomadores de decisão racionais e inteligentes (MYERSON, 1991). Isto leva a uma metodologia de estudo de tomada de decisões estratégicas, onde os jogadores escolhem ações que visam maximizar a sua utilidade.

2.2.1 Conceitos básicos

Esta subseção aborda alguns conceitos básicos e termos específicos da Teoria dos Jogos que permitem o seu entendimento.

(i) **Jogo:** Um jogo é um processo com as seguintes características básicas: Múltiplos jogadores participantes, decisões, interdependência dos resultados, racionalidade e conhecimento comum (SOTOMAYOR; BUGARIN, 2007).

Basicamente, um jogo possui três elementos:

- Um conjunto de jogadores $N = \{1, \dots, n\}$
- Um espaço de estratégias S_i para cada jogador $i \in N$
 - $s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ é uma combinação de estratégias que cada jogador adota.
- Uma função de resultados $P_i(s)$

(ii) **Jogador:** Entidades que podem impactar ou afetar os resultados do jogo no qual participam.

(iii) **Estratégia:** Ações disponíveis para cada jogador que formam um plano de ações completo. Uma estratégia determina uma ação para cada possível decisão do jogador dentro do jogo.

(iv) **Solução de um jogo:** Combinação de valores que se estabelecem a cada possível fim de jogo, portanto, trata-se de uma previsão sobre o resultado do jogo. São valores esperados quando o término do jogo é aleatório.

(v) **Utilidade:** Ganho ou *payoff*. Trata-se de um conceito abstrato referente a quanto de “bem-estar” que um jogador consegue de um evento ou objeto. O ganho (*payoff*) relaciona um número ao desejo que o jogador tem por um resultado. Este número não é necessariamente um valor monetário.

(vi) **Função Utilidade:** Função que reflete as preferências racionais de um jogador para os valores de ganho (*payoff*) de um estado. A Função Utilidade indica o grau de felicidade de um jogador por estar no estado em que se encontra. Pode-se entender que a existência de uma Função Utilidade relaciona-se com as propriedades do “desejo” de um jogador que satisfaçam às suas restrições racionais. A Função de Utilidade é descrita da seguinte forma: $U(S) \rightarrow \mathbb{R}$, onde U é a utilidade, S é o estado em que o jogador se encontra.

(vii) **Decisão:** Representa uma ação do jogador no jogo, que é uma jogada realizada pelo jogador. Uma decisão de um jogador tem impacto nos valores de ganho e consequentemente em sua função utilidade.

A Teoria dos Jogos difere-se da Teoria da Decisão (SOTOMAYOR; BUGARIN, 2007) porque pelo menos duas entidades decisoras participam do processo. Os jogadores tomam

decisões que produzem resultados distintos para cada jogador do contexto. A decisão de um jogador possibilita gerar resultados completamente diferentes, dependendo das decisões de outros jogadores. O comportamento estratégico dos jogadores provém das hipóteses fundamentais da *racionalidade* e do *conhecimento comum*. Na racionalidade, cada jogador toma suas decisões para conseguir o melhor resultado possível para si no jogo. O conhecimento comum refere-se ao fato de todos os jogadores conhecerem as regras do jogo, bem como os resultados passíveis de serem obtidos, com base nas decisões tomadas.

2.2.2 Classes de jogos

A aplicabilidade da Teoria dos Jogos contempla um escopo extenso de situações. Conforme cada situação, especialmente o que se pretende responder com o modelo, emprega-se uma das formas de jogo, que podem ser categorizadas a seguir.

2.2.2.1 Jogos cooperativos e jogos não cooperativos.

A cooperação entre jogadores pode formar coalizões onde decisões são tomadas conjuntamente e de forma coordenada. Uma coalizão é uma aliança entre jogadores que cooperam entre si. Uma coalizão atua basicamente como um único jogador dentro dos jogos cooperativos. Uma coalizão é, portanto, um subconjunto dos jogadores presentes no jogo.

Por outro lado, em jogos não cooperativos, considera-se que não é possível a formação de coalizões, onde cada jogador é analisado de forma única.

2.2.2.2 Jogos de informação completa e incompleta.

Em jogos de informação completa, o jogador conhece as informações sobre outros jogadores e o valor que cada um atribui a cada possível resultado do jogo.

Em jogos com informação incompleta, cada jogador pode não saber quais os valores que os outros jogadores atribuem quanto aos possíveis resultados do jogo.

2.2.2.3 Jogos de informação perfeita e imperfeita.

Esta classificação relaciona-se à informação disponível a um jogador quando toma uma decisão. Esta informação relata o que ocorreu anteriormente quanto a dois tipos de

eventos: Jogadas (decisões) anteriores realizadas por outros jogadores e eventos aleatórios realizados ao longo do jogo.

Deste modo, em jogos de informação perfeita, um jogador, quando toma uma decisão, tem conhecimento de todas as decisões tomadas e eventos aleatórios ocorridos até então.

Em um outro sentido, em jogos de informação imperfeita, um jogador, ao tomar sua decisão, pode desconhecer decisões anteriores ou não saber do resultado de eventos aleatórios ocorridos anteriormente.

2.2.2.4 Jogos finitos e infinitos

Uma quantidade limitada de etapas (rodadas) estabelece um típico jogo finito. Jogos estáticos terminam em uma única etapa, logo são jogos finitos. Jogos dinâmicos, isto é, com mais de uma etapa, podem ser finitos, desde que terminem em uma quantidade estipulada de etapas, ou podem ser infinitos em um horizonte ilimitado.

2.2.2.5 Jogos discretos e contínuos

Quando o conjunto de jogadores é finito e cada jogador está associado a um conjunto finito de escolhas possíveis quando toma suas decisões, diz-se que o jogo é discreto.

Quando o conjunto de escolhas possíveis disponíveis a um jogador é possivelmente um conjunto denso, diz-se que o jogo é contínuo.

Quando o conjunto de jogadores é denso, diz-se que o jogo é contínuo de jogadores.

2.2.3 Modelagem formal de jogos

Na história da Teoria dos Jogos, os modelos formais vem sendo desenvolvidos para tratar os diversos problemas estratégicos que surgem. De maneira geral, destacam-se os seguintes modelos:

2.2.3.1 Jogos na forma coalizional

Emprega-se a forma coalizional para modelar jogos cooperativos, onde a descrição do jogo ocorre por meio de uma função que associa a cada coalizão (grupo de jogadores) um *payoff* que a própria coalizão pode proporcionar a si mesma de maneira independente das decisões dos jogadores externos à coalizão (SOTOMAYOR; BUGARIN, 2007).

A forma coalizional sem pagamentos laterais de um jogo cooperativo é dada por $(N, X, V(\geq_j)_{j \in N})$ Onde:

- N é um conjunto de jogadores tal que $N = \{1, 2, \dots, n\}$.
- X é um conjunto de todos os resultados possíveis do jogo. Não é necessariamente unidimensional.
- V é uma função característica ou coalizional tal que $V : 2^N \rightarrow 2^X$.
- para todo $j \in N$, existe uma relação de preferências \geq_j definida sobre os resultados pertencentes ao conjunto X .

As notações 2^N e 2^X representam respectivamente o conjunto de todos os subconjuntos de N e todos os subconjuntos de X .

Dada uma coalizão S , o conjunto $V(S) \subseteq X$ representa uma coleção de resultados pertencentes a X garantidos pela coalizão S que independem dos demais jogadores.

2.2.3.2 Jogos na forma normal ou estratégica

Jogos estáticos são mais adequadamente representados pela forma normal ou estratégica, na qual a descrição do jogo se dá por uma função que associa um perfil de resultados a cada perfil de decisões (SOTOMAYOR; BUGARIN, 2007). Um perfil de decisões é entendido como um conjunto que contém várias decisões, cada uma adotada por um jogador. Um perfil de resultados é um conjunto que contém resultados atribuídos a cada jogador, conforme as decisões descritas no perfil de decisões.

Na Forma Normal (ou estratégica), um jogo é dado pela Equação 2.2.1:

$$J = (N, (S_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N}) \quad (2.2.1)$$

onde:

- N é o conjunto de jogadores
- S_i é o conjunto de estratégias possíveis de serem adotadas pelo jogador i , para todo $i \in N$.
- Para todo $i \in N$, $u_i : \prod_{j \in N} S_j \rightarrow \mathbb{R}$ é a utilidade para o jogador i devido às escolhas dos outros jogadores. Deste modo, dado que cada jogador $j \in N$ escolhe a estratégia

$s_j \in S_j$ e $s = (S_j)_{j \in N}$, então a utilidade para o jogador i é $u_i(s) \in \mathbb{R}$. O valor $u_i(s)$ também é chamado de consequência, resultado ou *payoff* do jogo para o jogador i .

- A escolha $s = (s_j)_{j \in N}$ representa um perfil de estratégias.

Na Forma Normal (ou estratégica), as estratégias são escolhidas de forma simultânea pelos jogadores, de modo que cada jogador não observa a estratégia do outro.

2.2.3.3 Jogos na forma extensiva

Adequada para jogos dinâmicos, a forma extensiva lança mão da Teoria dos Grafos para representar o jogo por meio de uma árvore de decisão (SOTOMAYOR; BUGARIN, 2007). Em um jogo representado pela forma extensiva, especifica-se: 1) O conjunto de jogadores; 2) Quando cada jogador tem que se mover; 3) O que é possível cada jogador fazer a cada uma das suas oportunidades de movimentação; 4) O conhecimento de cada jogador a cada uma de suas oportunidades de movimentação e 5) O ganho para cada jogador a cada combinação de movimentos passíveis de escolha pelos jogadores.

2.2.3.4 Jogos em formatos híbridos

Alguns jogos podem ainda ser modelados de maneira híbrida, pois contêm aspectos da forma normal e da forma extensiva. Com isto a modelagem emprega uma árvore de jogo, onde cada nó de decisão representa um jogo completo, com os resultados do momento (SOTOMAYOR; BUGARIN, 2007).

2.2.3.5 Primeiro exemplo de jogo: Dilema dos Prisioneiros

Na literatura de Teoria dos Jogos, um dos exemplos clássicos é o famoso jogo denominado *Dilema dos Prisioneiros* (SOTOMAYOR; BUGARIN, 2007). Neste jogo, dois ladrões roubam uma residência, porém são avistados por uma testemunha. O relato da testemunha ao delegado faz com que os ladrões sejam presos e o produto do roubo recuperado. No entanto, no momento do reconhecimento dos ladrões, a testemunha fica em dúvida, em razão de ter avistado os ladrões à noite. O delegado prende cada ladrão em celas separadas, impossibilitando a comunicação entre os bandidos. O delegado diz a cada um, em separado, que os dois foram identificados e que terão a chance de assumir o crime. Caso os dois confessem sua participação no roubo, cada ladrão permanecerá preso por cinco meses. Caso apenas um confessar, aquele que confessou será libertado como bônus pela

delação premiada em contribuição pelo esclarecimento do crime, enquanto que o ladrão que não confessou ficará preso por 10 meses como agravante pela obstrução ao trabalho da polícia. O delegado então se retira, mas, cada ladrão percebe que, se ambos permanecerem calados, não poderão ser incriminados por roubo, mas apenas por receptação de mercadoria roubada, cuja sanção é de apenas um mês de prisão.

O problema do jogo *Dilema dos Prisioneiros* está justamente no fato dos jogadores (prisioneiros) não poderem se comunicar e combinar estratégias para atingir um resultado mais favorável para ambos, isto é, combinar o perfil de estratégias onde ambos não confessam e ficam apenas um mês na prisão, melhorando desta maneira a utilidade de cada jogador sem reduzir a utilidade do outro. Com isto, para não correr o risco de enfrentar dez meses de prisão, os dois jogadores podem vir a adotar um perfil de estratégias onde ambos confessam e ficam cinco meses presos.

O jogo *Dilema dos Prisioneiros* possui 2 jogadores ($n = 2$). Cada jogador possui duas possíveis estratégias: Confessar ou não confessar. Tem-se então que $S_1 = \{C, N\}$ e $S_2 = \{c, n\}$ são os espaços de estratégias para os jogadores 1 e 2, respectivamente. Os resultados possíveis do jogo são apresentados na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Dilema dos Prisioneiros - resultados do jogo.

$u_1(C, n) = 0$	$u_1(C, c) = -5$	$u_1(N, n) = -1$	$u_1(N, c) = -10$
$u_2(C, n) = -10$	$u_2(C, c) = -5$	$u_2(N, n) = -1$	$u_2(N, c) = 0$

Quando a quantidade de jogadores é limitada a 2 ou 3, e também a quantidade de estratégias, o jogo pode ser representado por uma matriz, conhecida como matriz de *payoff*. A Tabela 2.2 apresenta a matriz *payoff* para o jogo *Dilema dos Prisioneiros*.

Tabela 2.2 – Dilema dos Prisioneiros - Matriz de *payoff*.

		Jogador 2	
		Confessar	Não confessar
Jogador 1	Confessar	(-5, -5)	(0, -10)
	Não confessar	(-10, 0)	(-1, -1)

2.2.3.6 Segundo exemplo de jogo: Caça ao Cervo

Um outro exemplo conhecido é o jogo *Caça ao Cervo* (*Stag-Hunt*), originalmente sugerido por Rousseau (ORDESHOOK, 1986), que representa o dilema entre segurança e cooperação social. Neste jogo, dois caçadores atuam em uma área que contém cervos e

lebres. Uma caçada bem sucedida de um único cervo adulto exige a participação dos dois caçadores, por outro lado, caçar uma lebre é muito simples e um único caçador pode capturar várias lebres, porém a quantidade de carne nunca é maior que a quantidade de um único cervo adulto capturado em cooperação. Antes de iniciar a caçada, os caçadores decidem: Ou cooperar para capturar um cervo, ou Caçar individualmente as lebres. Caso decidam caçar lebres, a área de caça será dividida ao meio. Caso contrário, os caçadores usarão a área inteira para perseguir um cervo, porém devem se separar, voltando a se encontrar apenas no fim da caçada. A partir do momento em que separam, a situação torna-se uma questão de confiança, pois como saber se os caçadores cumprirão o acordo, concentrando-se em perseguir um cervo e resistindo à tentação de apanhar lebres?

A Tabela 2.3 apresenta a matriz de *payoff* para o jogo *Caça ao Cervo*.

Tabela 2.3 – Caça ao Cervo (*Stag-Hunt*)- Matriz de *payoff*.

		Caçador 2	
		Cervo	Lebre
Caçador 1	Cervo	(4, 4)	(0, 3)
	Lebre	(3, 0)	(2, 2)

2.2.4 Equilíbrio de Nash

O Equilíbrio de Nash, configura uma situação onde cada jogador não possui motivação em alterar sua estratégia dentro do jogo se os outros jogadores também assim não fizerem. Isto determina a existência de um equilíbrio de estratégias mistas em jogos não-cooperativos, que foi provado pelo matemático John Nash em seus trabalhos “*Non-cooperative Games*” (NASH, 1950b) e “*Equilibrium Points in n-Person Games*” (NASH, 1950a). Este equilíbrio ficou conhecido na literatura como *Equilíbrio de Nash*, mas também é chamado de solução estratégica do jogo.

Formalmente, seja um jogo $J = (N, (S_i)_{i \in N}, (u_i)_{i \in N})$ em forma normal. Um dado perfil de estratégias $s^* = (s_i^*)_{i \in N}$ é um *equilíbrio de Nash* se para o jogador $i = 1, \dots, n$, dadas opções dos outros jogadores (s_{-i}^*), o melhor que o jogador i pode fazer é escolher s_i^* , conforme a Equação 2.2.2:

$$\forall i \in N, \forall s'_i \in S_i, u_i(s^*) \geq u_i(s'_i, s_{-i}^*) \quad (2.2.2)$$

onde u_i é a utilidade do jogador i resultante da adoção de um perfil de estratégias.

No exemplo do jogo *Dilema dos Prisioneiros*, a situação em que os dois confessam representa um Equilíbrio de Nash, pelo fato de a estratégia “confessar” ser dominante,

por que os ladrões tendem a optar por esta estratégia, já que, na pior situação, aquele que optar por esta estratégia cumpre uma pena de cinco meses, pois do contrário corre o risco de permanecer dez meses preso.

O exemplo do jogo *Caça ao Cervo* possui dois Equilíbrios de Nash em estratégias puras (ou os caçadores capturam um cervo ou capturam lebres), um representa o *risco dominante* e o outro o *payoff dominante*. O risco dominante reflete a escolha da estratégia de caçar cervos e confiar que o outro jogador fará o mesmo.

2.2.5 Ótimo de Pareto

Em jogos cooperativos, um dos problemas a se verificar diz respeito a encontrar pontos da região de ganhos (*payoffs*) que satisfaçam todos os jogadores (ou que seja justo para todos) (TONELLI, 2006). Isto envolve descobrir onde é possível minimizar as perdas para todos os jogadores envolvidos. Neste ponto específico, não é possível maximizar a função utilidade de um jogador, sem minimizar a utilidade de outros jogadores. Descobrir este ponto implica primeiramente em remover os pontos que são ruins para os jogadores. Dado o conjunto Π_{coop} de todos os ganhos (*payoffs*) possíveis e esperados, diz-se que um ponto $(u_1, v_1) \in \Pi_{coop}$ domina outro ponto $(u_0, v_0) \in \Pi_{coop}$ se $u_1 > u_0$ e $v_1 \geq v_0$ ou se $v_1 > v_0$ e $u_1 \geq u_0$. Denomina-se ponto **ótimo de Pareto**, um ponto $(u, v) \in \Pi_{coop}$ não dominado por qualquer outro ponto de Π_{coop} .

No exemplo do jogo *Dilema dos Prisioneiros*, a situação em que os dois negam o crime representa um ponto ótimo de Pareto, caso os ladrões pudessem combinar o perfil de estratégias. É possível observar que este caso, onde ambos optam pela estratégia “não confessar”, representa a melhor situação simultânea para os dois jogadores, onde não é possível melhorar a situação de cada ladrão, sem que um ou outro seja prejudicado.

2.3 TEORIA DOS JOGOS *SATISFICING*

Diariamente em suas vidas, as pessoas tomam decisões que nem sempre são decisões ótimas, mas decisões suficientemente boas. Este tipo de decisão é denominada decisão “*Satisficing*” (STIRLING, 2003). Na visão de Stirling (2003), muitos algoritmos computacionais de tomada de decisão buscam de forma dogmática uma solução ótima, rejeitando qualquer outra. Entretanto, dadas as condições de existência de outros jogadores que também tomam decisões no mesmo contexto, possivelmente esta solução ótima não é alcançada. Portanto, as técnicas de decisão *Satisficing* funcionam como uma abordagem alternativa na busca de soluções suficientemente boas no contexto de múltiplos jogadores.

[Stirling \(2003\)](#) afirma que é intuitivo achar que todas as decisões deveriam ser ótimas, pois os tomadores de decisão deveriam tomar a melhor escolha possível, dado o conhecimento disponível. Entretanto não se pode escolher uma opção racionalmente, até mesmo se conhece algo melhor, a menos que se saiba que esta decisão é “boa o suficiente”. Escolher uma decisão *Satisficing*, isto é, “boa o suficiente”, é a aspiração fundamental de tomadores de decisão racionais, sendo a decisão ótima um prêmio ou vantagem adicional. [Stirling \(2003\)](#) comenta que a proposta da abordagem *Satisficing* busca suplementar, no lugar de suplantiar, abordagens existentes no processo de tomada de decisão.

O conceito de otimização é uma instanciação matemática da racionalidade individual que é uma doutrina do egoísmo exclusivo, entretanto, em configurações de tomada de decisão em grupo, em geral, é impossível otimizar simultaneamente para todos os indivíduos ([STIRLING, 2003](#)). Prevalece então que os participantes busquem uma solução de equilíbrio, onde é impossível que um simples membro possa melhorar seu nível de satisfação por meio de atitude unilateral ([STIRLING, 2003](#)). Racionalidade de grupo não é uma consequência lógica da racionalidade individual, e os interesses de grupo não são facilmente acomodados pela racionalidade individual ([LUCE; RAIFFA, 1957](#)).

Cooperação é um conceito muito mais sofisticado que competição ([STIRLING, 2003](#)). Competição é o resultado natural de racionalidade individual, mas racionalidade individual confia na suposição mínima de que um indivíduo manterá seus interesses individuais acima de tudo e de todos. Por outro lado, cooperação verdadeira exige que os tomadores de decisão ampliem suas esferas de interesse com respeito ao interesses de outros participantes, até mesmo seu próprio custo individual. Cooperação verdadeira é muito difícil de gerar com racionalidade individual ([STIRLING, 2003](#)).

Com base nesta visão, uma solução ótima dificilmente pode ser obtida com racionalidade individual em ambiente com múltiplos tomadores de decisão. Faz-se necessário então utilizar outra forma de racionalidade.

2.3.1 Racionalidade

[Stirling \(2003\)](#) lembra que [Simon \(1959\)](#) adotou o termo “*satisficing*” para descrever uma atitude cuja ação satisfaz às exigências mínimas necessárias para atingir uma meta em particular, entretanto a intenção original de [Simon \(1959\)](#) envolvia uma racionalidade extrínseca para uma opção ser “boa o suficiente”, onde a classificação e posicionamento de uma determinada opção é feita com respeito a atributos que necessariamente não fazem parte da própria opção. [Stirling \(2003\)](#) propõe sua noção de *satisficing*, reorganizando a ideia de [Simon \(1959\)](#) quanto a uma opção ser “boa o suficiente”, porém em termos

intrínsecos.

Racionalidade intrínseca e racionalidade extrínseca levam a decisões intrínsecas e decisões extrínsecas, respectivamente. Para explicitar melhor este conceito, convém expor exemplos destes dois formatos de decisão.

Admitindo-se, por exemplo, que um cliente deseja comprar um carro, com base nos modelos extrínsecos e intrínsecos podem ocorrer os seguinte tipos de formato de decisão (STIRLING, 2003):

- **Formato de uma decisão extrínseca:** Ou o cliente seleciona o carro A, ou seleciona o carro B (presumivelmente com base em critérios de custo e espaço interno).
- **Formato de uma decisão intrínseca:** Ou o cliente seleciona o carro A, ou rejeita o carro A.

Observa-se então uma diferença sutil entre os dois formatos. No modelo extrínseco, o cliente combinaria custo e espaço interno em uma única utilidade que poderia ser ordenada. No modelo intrínseco, o cliente estabelece a avaliação binária de custo versus espaço interno.

Stirling (2003) define que uma opção é intrinsecamente *satisficing* se for intrinsecamente racional.

2.3.2 Praxiologia

Praxiologia é o ramo de conhecimento que se trata de atividade prática e conduta humana (STIRLING, 2003). A Praxiologia está no domínio prático e suas preocupações próprias relacionam-se a “como agir”. Diferentemente da Epistemologia que, de forma predominante, refere-se ao domínio cognitivo com preocupações próprias quanto a “o que acreditar”. Por um lado, a Epistemologia é utilizada para classificar proposições tomando por base o conhecimento e crenças sobre o conteúdo destas proposições, por outro lado, a Praxiologia é empregada para classificar opções considerando-se a efetividade destas opções.

2.3.3 Teoria da Utilidade Praxiológica

A Utilidade Praxiológica emprega duas funções para tratar as escolhas de um tomador de decisão: **rejeitabilidade** e **seletibilidade** (STIRLING, 2003).

A rejeitabilidade pode, por exemplo, estar associada ao grau de consumo de recursos. A função de rejeitabilidade está em conformidade com os axiomas de probabilidade. Com isto, dado um conjunto finito (ou contínuo) de opções U , expressa-se que a função de rejeitabilidade é uma função de massa p_R (ou de densidade caso U seja contínuo), tal que $p_R(u) \geq 0$ para todo $u \in U$ e $\sum_{u \in U} p_R(u) = 1$ ou $(\int_U p_R(u) du = 1)$. p_R é então denominada **função de massa de rejeitabilidade**.

Portanto, opções ineficientes (que envolvam alto consumo de recurso) deveriam ser altamente rejeitáveis, pois, ignorando considerações de sucesso, uma entidade decisora estaria propensa a rejeitar opções que resultam em grandes custos, tal como alto consumo de energia, exposição ao risco etc.

A seletibilidade pode ser entendida como o grau de suporte ao sucesso que uma opção possui. A função de seletibilidade p_S e é denominada **função de massa de seletibilidade** (função de densidade, para U contínuo). Calcula-se então a utilidade praxiológica média para qualquer conjunto $A \subset U$, pesando a utilidade pelo grau de suporte ao sucesso associado com cada u e somando (integrando) sobre todo $u \in U$. A utilidade praxiológica esperada é dada pelas Equações 2.3.1 e 2.3.2, para U finito ou para U contínuo, respectivamente.

$$\pi(A) = \sum_{u \in A} [p_S(u) - qp_R(u)] \quad (2.3.1)$$

$$\pi(A) = \int_A [p_S(u) - qp_R(u)] du \quad (2.3.2)$$

O parâmetro q das Equações 2.3.1 e 2.3.2 é o **índice de coragem** do problema de decisão e reflete o grau no qual a entidade decisora está disposta a arriscar, rejeitando opções com possibilidade de sucesso no interesse da conservação de recursos. De modo equivalente, q pode ser visto como o **índice de cautela**, tal que ele determina o grau no qual a entidade decisora está disposta a aceitar em termos de aumento de custos para alcançar êxito. Quando $q = 1$, atribui-se peso igual para interesses de sucesso e conservação de recurso. Fazendo $q > 1$ atribui-se maior peso à conservação de recursos que ao sucesso.

A partir desta exposição, é possível obter o maior conjunto de opções para as quais a seletibilidade é maior ou igual a q vezes a rejeitabilidade, por meio da escolha do conjunto que maximiza utilidade praxiológica esperada. Isto resulta no **conjunto *satisficing***,

conforme a Equação 2.3.3

$$\sum_q = \arg \max_{ACU} \pi(A) = \{u \in U : p_S(u) \geq qp_R(u)\} \quad (2.3.3)$$

Então, \sum_q é o conjunto de todas as opções onde os benefícios (seletibilidade) excedem os custos (rejeitabilidade).

Nota-se que a utilidade praxiológica provê uma definição para decisões *satisficing* que é consistente com a racionalidade intrínseca, considerando que fica estabelecida uma avaliação binária em termos de benefícios (seletibilidade) e custos (rejeitabilidade).

2.4 SISTEMAS ADAPTATIVOS COMPLEXOS

O conceito de sistemas complexos foi proposto inicialmente por [Holland \(1995\)](#). Um sistema adaptativo complexo pode ser definido como o conjunto com elevado número elementos ativos (indivíduos, partes, entidades, entre outros) diversificados em formas e capacidades ([HOLLAND, 1995](#)), que interagem e se adaptam uns aos outros conforme um conjunto regras que avaliam e respondem ao comportamento mútuo ([STACEY, 1996](#)), de tal maneira que o sistema, em nível global, apresenta um comportamento que emerge das ações combinadas de indivíduos, conhecido como *comportamento emergente*, de modo que o sistema como um todo não pode ser entendido apenas a partir da informação armazenada no nível individual ([FERREIRA, 2001](#)).

A Ciência da complexidade tem sido empregada com sucesso no estudo da física (por exemplo, fluidos turbulento ([GELL-MANN, 1994](#))), e fenômenos biológicos (por exemplo, as interações entre os componentes de células vivas) ([HARTWELL et al., 1999](#); [ANDERSON; MAY, 1979](#)). Os conhecimentos adquiridos a partir do estudo de sistemas físicos complexos também puderam ser aplicados a sistemas complexos sociotécnicos ([MANDELBROT; HUDSON, 2005](#); [AXELROD, 1984](#); [BORNHOLDT; SCHUSTER, 2003](#)).

O Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) apresenta características de sistemas complexos adaptativos, tais como: a) Grande número de elementos e variáveis; b) Estrutura em rede interligando os elementos (aeroportos, empresas aéreas, controle de tráfego aéreo entre outros); c) Natureza diferente entre os elementos que o compõe: aeroportos, condições do tempo, aeronaves, instâncias de controle de tráfego; d) Organização complexa de relacionamento entre os elementos distintos; e) Cada elemento do sistema ATFM também pode apresentar características complexas, por exemplo, o controle de tráfego aéreo, as empresas aéreas e os aeroportos; f) Adaptabilidade às mudanças de ce-

nário; g) Auto-organização; h) Indeterminismo; i) Cooperação - agregação (união para atingir os objetivos comuns); j) Não linearidade e imprevisibilidade.

No sistema ATFM, observa-se também um comportamento emergente, que pode ser entendido como a fluidez segura do tráfego de aeronaves no espaço aéreo, considerando que todo o sistema parece convergir para este fim.

Conforme destaca o estudo dos sistemas complexos adaptativos, sistemas com esta natureza exigem um entendimento global com base em seu comportamento emergente, pois não se consegue entender o sistema a partir de suas entidades individuais, portanto convém utilizar uma abordagem teórica que contemple todas as partes de forma simultânea.

2.5 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Este capítulo apresentou a base teórica com o resgate de conceitos em Teoria dos Jogos, Teoria do Jogos *Satisficing* e Sistemas Adaptativos Complexos.

Os conceitos apresentados permitiram um entendimento das teorias que embasam a metodologia proposta neste trabalho e fornecem uma ideia da complexidade envolvida na tarefa proposta.

A ideia central do capítulo foi apresentar os conteúdos necessários ao entendimento dos conceitos aplicados nesta pesquisa, no entanto para aprofundamento de conhecimentos nestas teorias, se faz necessária a consulta às obras originais dos autores.

3 O GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO AÉREO

3.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo apresenta os conceitos principais sobre o Serviço de Gerenciamento de Tráfego Aéreo com descrição da estrutura do espaço aéreo e infraestrutura aeroportuária. O capítulo também resgata soluções que já foram implementadas para otimizações individuais de cada entidade do cenário ATFM; levantamento de trabalhos já desenvolvidos em Teoria dos Jogos *Satisficing* com foco em gerenciamento de tráfego aéreo e funções de preferências das entidades. Estes conceitos são importantes para melhor contextualizar o domínio do problema, apresentar as abordagens já utilizadas nas soluções de otimização individual das entidades e também mapear as funções que definem as preferências de cada entidade que posteriormente serão utilizadas na definição de funções próprias da metodologia para aprimorar a tomada de decisão colaborativa proposta neste trabalho.

3.2 O SERVIÇO DE GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO AÉREO

O Serviço de gerenciamento de tráfego aéreo é composto das seguintes atividades (BRASIL, 2010):

- Gerenciamento do Espaço Aéreo (*ASM - Airspace Management*);
- Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control - ATC*);
- Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*ATFM - Air Traffic Flow Management*);

A atividade de Gerenciamento do Espaço Aéreo compreende a administração quanto à criação de rotas, configuração e dimensionamento de setores, regiões de informação de voo e áreas terminais (BRASIL, 2010).

O Serviço de Controle de Tráfego Aéreo, ou Serviço ATC, se propõe a monitorar e autorizar operações de aeronaves no espaço aéreo, controlando o voo a partir da decolagem até o efetivo pouso. A finalidade principal do Controle de Tráfego Aéreo é prevenir colisões entre aeronaves ou aeronaves e obstáculos na área de manobras, conforme descreve o manual *ICA 100-12* (BRASIL, 2009).

O Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo busca calibrar o fluxo de aeronaves de acordo com a capacidade disponível do espaço aéreo, conforme imposição de legislação internaci-

onal, para se conseguir um ritmo adequado e seguro para o tráfego de aeronaves (CRESPO *et al.*, 2008).

Gerenciar o fluxo de tráfego aéreo consiste em considerar capacidades operacionais do aeroporto e do controle de tráfego aéreo. Com isto, dois principais conceitos de capacidades se tornam evidentes: Capacidade Aeroportuária e Capacidade ATC.

(i) **Capacidade aeroportuária:** Andrews (1999) afirma que capacidade aeroportuária pode ser definida como o máximo processamento de operações que um aeroporto pode sustentar sob um conjunto específico de condições operacionais.

(ii) **Capacidade ATC:** segundo descreve o manual ICA 100-22 (BRASIL, 2010), capacidade ATC representa a habilidade de controle do órgão ATC em forma de medida da quantidade de aeronaves que entram em dada porção do espaço aéreo, considerando as condições meteorológicas, recursos humanos e tecnológicos disponíveis, e demais aspectos que possam influir na carga de trabalho do controlador de tráfego responsável pelo espaço aéreo.

3.2.1 Medidas restritivas de fluxo

O Serviço de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo, ou Serviço ATFM, no intuito de atingir seus objetivos, executa ações que são aplicadas em situações de desbalanceamento entre fluxo de tráfego e as capacidades aeroportuária e ATC. Estas ações são chamadas de medidas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, ou meramente, medidas restritivas, uma vez que impõem uma restrição ao fluxo de tráfego com vista a alcançar o balanceamento. Conforme destaca o manual ICA 100-22 (BRASIL, 2010), as medidas restritivas podem ser:

(i) **Esperas em Voo** - Em razão a aumentos inesperados da demanda, condições meteorológicas ou interrupção dos serviços, os órgãos do Serviço ATC geralmente aplicam medidas de espera em voo de forma imediata. Esperas em voo podem também ser aplicadas em situações de desbalanceamento de curta duração.

(ii) **Restrição em Altitude** - Aplica-se esta medida em geral para segregar diferentes fluxos de tráfego, ou com vista a distribuir aviões com destino a determinados setores do espaço aéreo. Tal tipo de medida visa, em geral, evitar o cruzamento de níveis de espera e para redução de atrasos em solo, no caso do usuário optar pelo voo em níveis inferiores.

(iii) **Balanceamento na Entrada ou Saída de TMA** - Aplicada em geral para diminuir a concentração de demanda em um determinado fixo de marcação na entrada da

TMA e, simultaneamente, sequenciar os aviões para determinado aeródromo.

(iv) Programa de Atraso no Solo - Visa reter as aeronaves nos aeródromos de partida, atribuindo-lhes SLOT ATC, para gerenciar as chegadas em uma localidade específica. É geralmente usada para se evitar esperas em voo.

(v) Espera no Solo - Visa manter as aeronaves no solo, condicionando suas partidas à redução ou ao fim do evento que causou o impacto no fluxo de tráfego aéreo. Trata-se de uma das medidas mais restritivas, onde se deve explorar e aplicar medidas alternativas.

(vi) Separação por Milhas - Tem por objetivo aumentar a separação longitudinal em milhas náuticas. Geralmente é empregada para que tráfegos que convergem ou decolam possam ingressar em um determinado fluxo.

(vii) Separação por Minutos - Visa estabelecer um intervalo de minutos requerido entre sucessivos tráfegos.

(viii) Rerroteamento - Consiste no emprego, obrigatório ou não, de rotas pré-definidas, para assegurar fluidez do tráfego aéreo; desviar de espaços aéreos congestionados; impedir o congestionamento do espaço aéreo; e evitar áreas com formação meteorológicas severas.

(ix) Programa de Sequenciamento - Visa atribuir um intervalo específico entre aeronaves. O intervalo pode ser determinado por auxílio computacional ou pelos gerentes de fluxo. Tipos diferentes de programas podem ser utilizados nas fases diferentes do voo: Sequenciamento de decolagem com horário para cada decolagem que permite um cadenciamento de saídas; sequenciamento em rota para determinar um horário de cruzamento sobre um ponto fixo da rota; e sequenciamento de chegada com atribuição de horário de cruzamento em um ponto fixo para aviões que se destinam a um mesmo aeródromo ou TMA.

(x) Setorização Dinâmica - Visa transferir um determinado fluxo de dentro de um setor para outro setor adjacente que tenha capacidade disponível, com alteração dos limites geográficos e/ou verticais de ambos setores.

3.2.2 Estrutura do espaço aéreo

O espaço aéreo está estruturado de maneira a viabilizar o monitoramento e controle de aeronaves que por ele trafegam. Esta estruturação apresenta os elementos a seguir descritos:

(i) Região de Informação de Voo - FIR (*Flight Information Region*): Representa uma fração do espaço aéreo. Trata-se de um polígono que compreende uma grande área

sob responsabilidade de um órgão controlador que presta serviços de controle de tráfego aéreo e gerenciamento de fluxo de tráfego de modo a permitir a segurança e fluidez do tráfego de aeronaves no espaço aéreo controlado. No Brasil, as FIR são controladas pelos CINDACTAs (Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo). O espaço aéreo brasileiro está dividido em cinco FIR que compreendem todo o território e mais uma área oceânica, num total de 22 milhões de quilômetros quadrados, conforme mostra a Figura 3.1.

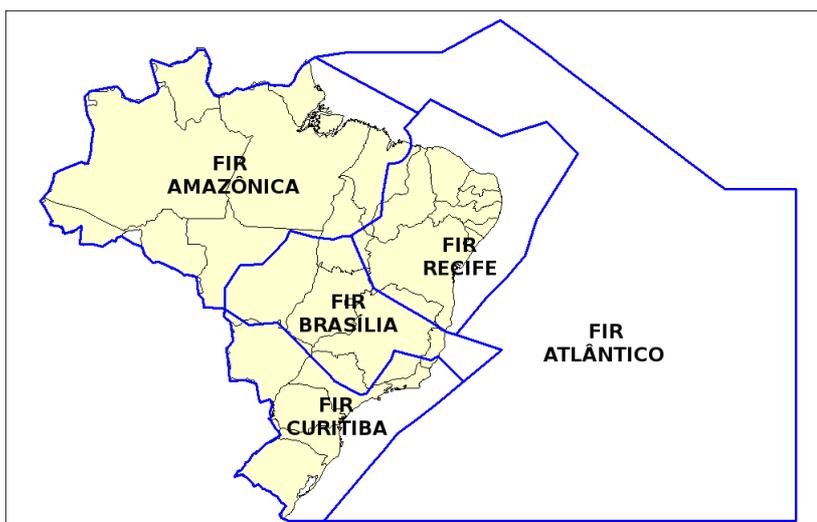


Figura 3.1 – Regiões de Informação de Voo.

A Tabela 3.1 apresenta as FIR brasileiras e seus órgãos controladores.

Tabela 3.1 – Regiões de Informação de Voo do Brasil e órgãos controladores

Sigla	Descrição	Órgão controlador
FIR BS	FIR Brasília	CINDACTA I
FIR CW	FIR Curitiba	CINDACTA II
FIR RE	FIR Recife	CINDACTA III
FIR AO	FIR Atlântico	CINDACTA III
FIR AZ	FIR Amazônica	CINDACTA IV

(ii) **Setores de controle:** Internamente, cada FIR está dividida em setores fixos de controle sob a responsabilidade de dois controladores e um supervisor.

(iii) **Áreas Terminais:** Além dos setores, existem as Áreas Terminais (*Terminal Manoeuvring Area - TMA*) que são áreas de confluência de tráfego aéreo. Uma TMA pode conter vários aeroportos. O Controle de Aproximação (**APP**) é o órgão ATC responsável pelo controle nas TMA. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de estrutura de uma TMA.

(iv) **Zona de Controle:** A Zona de Controle - CTR (*Control Zone*) é o espaço aéreo que contém um ou mais aeródromos próximos. A CTR tem capacidade para conter as traje-

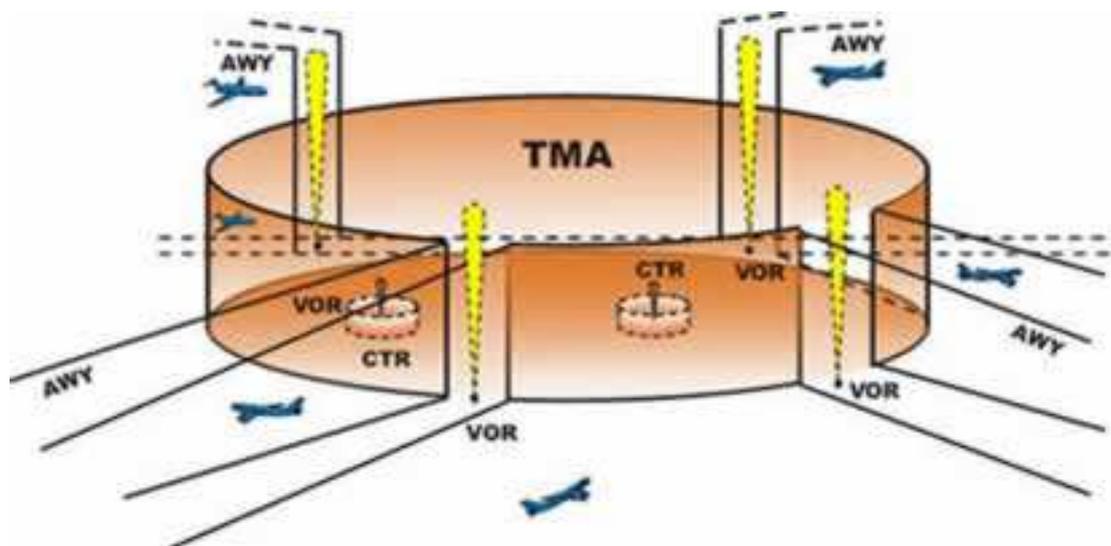


Figura 3.2 – Estrutura de uma Área Terminal - TMA. Fonte Bastos e Baum (2007).

tórias dos procedimentos de aproximação e saída por instrumentos e possui configuração variável, em geral 8 a 15 milhas náuticas de limite lateral. O Controle de Aproximação (**APP**) é o órgão ATC responsável pelo controle nas CTR.

(v) **Zona de Tráfego de Aeródromo:** Também conhecida pela sigla ATZ (*Aerodrome Traffic Zone*), é o espaço aéreo controlado que compreende o circuito de tráfego e áreas de manobras de um aeródromo específico. A ATZ é estabelecida para possibilitar tráfego em condições visuais e para proteger o tráfego de aeródromo. Possui configuração variável, em geral 2 a 5 milhas náuticas de limite lateral. A Torre de Controle (**TWR**) é o órgão responsável pelo controle na Zona de Tráfego de Aeródromo.

(vi) **Aerovias:** As aerovias - AWY (*Airway*) são caminhos marcados no espaço aéreo por onde trafegam aeronaves. A Figura 3.3 apresenta a estrutura do espaço aéreo com as aerovias que interligam as TMA.

3.2.3 A infraestrutura aeroportuária

Conforme conceitua o artigo 26 da Lei 7565/86 (Código Brasileiro de Aeronáutica), o Sistema Aeroportuário Brasileiro é composto pelo conjunto de aeródromos brasileiros, com todas as pistas de pouso, pistas de táxi, pátio de estacionamento de aeronaves, terminal de carga aérea, terminal de passageiros e as respectivas facilidades que propiciam a segura operação de aeronaves. No entanto, cabe a ressalva de que os aeródromos do sistema possuem características especiais e são abertos ao tráfego aéreo em geral. A Tabela 3.2 apresenta os tipos de aeródromos.

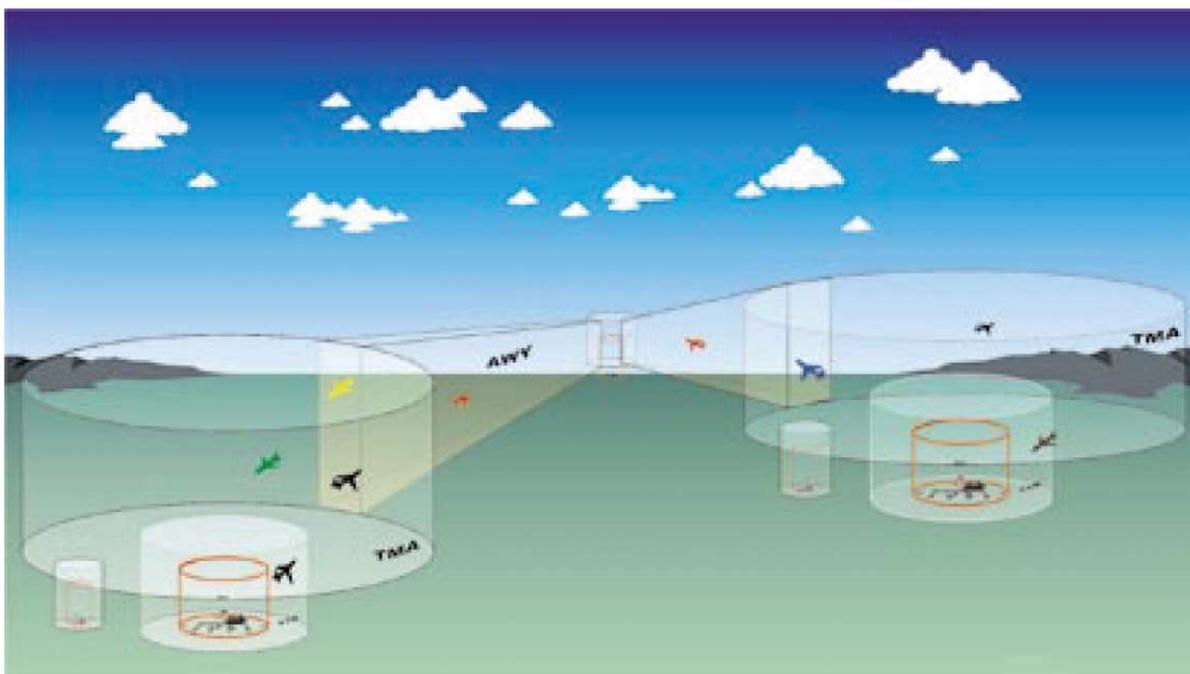


Figura 3.3 – Espaço aéreo controlado. TMA e aerovias. Fonte Rolim, Portela e Alves (2004).

Tabela 3.2 – Tipo de Aeródromos Brasileiros - Fonte: (ANAC, 2012)

Tipo	Finalidade
<i>Aeródromo civil</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aeródromo destinado, em princípio, ao uso de aeronaves civis.
<i>Aeródromo comunitário</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aeródromo público destinado a servir pequenas cidades e para ser utilizado por aeronaves leves, vedada a operação da aviação regular.
<i>Aeródromo privado</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aeródromo civil que só poderá ser utilizado com permissão de seu proprietário, sendo vedada a sua exploração comercial.
<i>Aeródromo público</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aeródromo civil destinado ao tráfego de aeronaves em geral.
<i>Aeródromo restrito</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aeródromo público, construído em áreas de propriedade pública, de uso reservado do Órgão que o construiu e que tem sob sua administração, cuja exploração comercial é vedada, só podendo ser utilizado com autorização da respectiva entidade pública.
<i>Aeródromo transitório</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aeródromo civil, para uso provisório e destinado a atender aos projetos de desenvolvimento, construção de estradas, usinas, barragens, proteção à lavoura, pesquisa mineral ou exploração de jazida e situações de emergência ou calamidade pública.
<i>Aeródromo transitório</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Todo aeródromo público dotado de instalações e facilidades para apoio às operações de aeronaves e de embarque e desembarque de pessoas e cargas.

A infraestrutura brasileira de aeroportos forma uma rede de aeroportos interligados. O fluxo de tráfego aéreo que segue por esta rede de aeroportos é estabelecido pelas rotas e aerovias pelas quais seguem os voos das empresas aéreas.

A Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero) é responsável por implantar, administrar, operar e explorar industrial e comercialmente a infraestrutura aeroportuária e de apoio à navegação aérea, prestar consultoria e assessoramento em suas áreas de atuação e na construção de aeroportos, conforme descreve o Art. 4º de seu estatuto (INFRAERO, 2012). A Infraero atualmente é gestora dos principais aeroportos brasileiros.

3.3 SOLUÇÕES COM OTIMIZAÇÃO INDIVIDUAL DE ENTIDADES

No domínio de ATFM, as soluções para muitos problemas de otimização de entidades têm sido propostas por pesquisadores há algumas décadas. Os trabalhos contribuem com soluções para evitar congestionamentos, gerenciamento de conflitos no ar, cadenciamento de decolagens, gerenciamento de partidas e taxiamento de aeronaves no pátio dos aeroportos e gerenciamento de serviços aeroportuários.

Em geral, as pesquisas estudam soluções de otimização locais de cada uma das principais entidades do fluxo aéreo. Esta seção apresenta algumas soluções propostas para cada uma destas principais entidades: O Gestor do Aeroporto, as Empresas aéreas e o Serviço ATC.

A Tabela 3.3 apresenta uma listagem dos trabalhos consultados. Trata-se de um resumo onde cada linha da Tabela 3.3 contém a entidade que é foco do trabalho, a abordagem utilizada e o título original do trabalho com autores e ano.

3.3.1 Pesquisas Direcionadas para o ATM/ATC

As pesquisas apresentadas nesta subseção trazem as preocupações dos pesquisadores direcionadas para o Serviço ATC. Foram relacionadas os seguintes trabalhos: Modelo matemático para resolução de conflito com taxa de desvio limitada (YOO; DEVASIA, 2013), Resolução de Conflitos de Voo baseado em otimização ACO (MENG; QI, 2012), Modelo de Balanceamento com Multi-Fluxos para Aplicação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo (SOUZA, 2008) e Programação dinâmica e grafos aplicados em ATFM (ZHANG; GAO; WANG, 2005).

(i) Modelo matemático para resolução de conflito com taxa de desvio limitada

O trabalho de Yoo e Devasia (2013) apresenta um método matemático para resolução de conflitos de rotas que se cruzam, denominado procedimento dissociado de resolução de conflitos (CRP). O conceito central está em dividir as principais rotas em diversos

Tabela 3.3 – Trabalhos e abordagens constantes no Estado da Arte

Entidade	Abordagem	Trabalho
Serviço ATC	Pesquisa Operacional	Provably Safe Conflict Resolution With Bounded Turn Rate for Air Traffic Control (YOO; DEVASIA, 2013)
Serviço ATC	Inteligência de Enxames	Flight Conflict Resolution for Civil Aviation Based on Ant Colony Optimization (MENG; QI, 2012)
Serviço ATC	Teoria dos Grafos	Modelo de Balanceamento com Multi-Fluxos Para Aplicação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo (SOUZA, 2008)
Serviço ATC	Teoria dos Grafos	Short-term flow management based on dynamic flow programming network (ZHANG; GAO; WANG, 2005)
Aeroporto	Teoria dos Grafos	Optimal control of airport operations with gate capacity constraints (KHADILKAR; BALAKRISHNAN, 2013)
Aeroporto	Algoritmos Genéticos	Airport Taxi Scheduling Optimization Based on Genetic Algorithm (LIU; GUO, 2010)
Aeroporto	Pesquisa operacional	Airport Logistics : Modeling and Optimizing the Turn-Around Process (NORIN, 2008)
Empresas Aéreas	Teoria dos Grafos	Research on the disrupted airline scheduling (QUANSHENG <i>et al.</i> , 2013)
Empresas Aéreas	Inteligência de Enxames	Airline crew rostering problem using particle swarm optimization (LIMLAWAN; KASEMSONTITUM; JEENANUNTA, 2011)
Empresas Aéreas	Sistemas Multiagentes	Multi-agent simulation of NAS infrastructure utilization in the presence of airline policies (CALDERÓN-MEZA; SHERRY.; CONSIGLIO, 2009)

caminhos para provocar maior espaçamento entre aeronaves, de modo a permitir cruzamentos sem conflitos. O objetivo do CRP é atender uma preferência central da entidade de controle de tráfego que diz respeito à segurança global da rede de rotas que é permeada de múltiplos cruzamentos.

Quando as aeronaves são espaçadas nas aerovias que se cruzam, pode não existir disponibilidade de espaço suficiente para as aeronaves passarem pelo ponto de interseção sem conflitos. Neste cenário, o CRP proposto separa aeronaves de cada rota em vários caminhos, com maior espaçamento entre as aeronaves em cada caminho. As aeronaves nestes caminhos, com espaçamento suficientemente grande entre elas, podem então passar pelo cruzamento ausentes de conflitos. Após os cruzamentos, as aeronaves nos diferentes caminhos são mescladas de volta para as aerovias originais. Este processo de desvio e retorno das aeronaves às rotas ocorre por meio de cálculos de ângulos de desvio, porém este processo está sujeito às imprevisibilidades do cenário de tráfego aéreo.

Para implementar este procedimento de resolução de conflitos, o trabalho descreve diversas formulações e otimizações matemáticas com suas respectivas provas.

Para testar o modelo, o trabalho empregou dados de maio de 2004 de um setor de controle próximo a Cleveland nos Estados Unidos.

Neste trabalho, foi demonstrado, conforme os testes, que para um dado espaço de chegada nas rotas que se cruzam, o ângulo permitido de desvio pode ser diferente e dependendo das condições meteorológicas, o limite da taxa de desvio poderá ser incluído ou não na análise. A análise do limite de desvio é importante para estabelecer a existência de procedimentos de convergência ou divergência de resolução do conflitos.

(ii) Resolução de Conflitos de Voo baseado em otimização ACO

O trabalho de [Meng e Qi \(2012\)](#) apresenta um método para resolução de conflitos para aviação civil baseado em otimização de colônia de formigas ACO (*Ant Colony Optimization*), trata-se de um trabalho que emprega inteligência de enxames.

Em razão do aumento do tráfego aéreo, a comunidade internacional de aviação civil propôs o paradigma Free Flight ([JACOBSEN, 2000](#)). Neste novo conceito, uma grande quantidade de tarefas de navegação são transferidas para os pilotos, de modo a escolher livremente a rota de voo, velocidade e altitude. Esta maior autonomia do piloto aumenta a possibilidade de conflitos. Com isto, tecnologias de detecção e resolução de conflitos são empregadas para melhorar a segurança e eficiência dos voos.

O trabalho realiza otimizações para os parâmetros de segurança da China, onde não há conflito quando a distância entre duas aeronaves é superior a 20km. Durante o voo em cruzeiro, as aeronaves voam em altas altitudes geralmente fixadas e com velocidade praticamente constante. Considerando-se exigências de conforto dos passageiros e consumo de combustível, as mudanças de altitudes são consideradas pequenas, com isto as mudanças em geral podem ocorrer apenas no plano horizontal. No trabalho, estas mudanças horizontais se refletem em ângulos do rumo que variam em cinco opções: -30° , -15° , 0° , 15° , 30° . Portanto, o problema de planejamento tridimensional é reduzido para um problema bidimensional.

No trabalho, verificou-se por meio de testes e simulações que a solução ACO simples, pode resolver o conflito de voo de forma eficaz.

(iii) Modelo de Balanceamento com Multi-Fluxos para Aplicação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo

Dissertação desenvolvida por [Souza \(2008\)](#) que descreve um sistema de auxílio à tomada de decisão baseado em Teoria dos Grafos e Inteligência Artificial que permite ofertar suporte ao Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Brasileiro. O modelo apresenta a arquitetura do Módulo de Balanceamento de Fluxo - MBF, parte que integra o Sistema de Apoio à Decisão Aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego (SISCON-FLUX). A pesquisa de [Souza \(2008\)](#) implementou um modelo de gerenciamento de fluxo

baseado em grafos com adaptações heurísticas para regulação dinâmica de fluxo.

A função principal do MBF é determinar o tempo de separação de decolagens a partir das áreas terminais contidas na Região de Informação de Voo de Brasília (FIR-BS) com o emprego de uma das técnicas de maximização de fluxo extraída da Teoria dos Grafos. O objetivo do MBF é prevenir ou mesmo reduzir congestionamentos nos setores da FIR Brasília (FIR-BS).

O MBF utiliza duas políticas para o balanceamento de fluxo: Distribuição igualitária e Distribuição priorizada do fluxo. As simulações realizadas por Souza (2008) mostraram que é possível reduzir a separação dos tempos de decolagem de 30% a 60%, dependendo da política adotada.

(iv) Programação dinâmica e grafos aplicados em ATFM

O trabalho de Zhang, Gao e Wang (2005) propõe um modelo de gerenciamento dinâmico de fluxo que apresenta melhoras em um modelo desenvolvido anteriormente por Ma, Cui e Cheng (2004).

O modelo considera rotas em diferentes rumos e níveis de voo na área de controle. A rede $G(I, A)$ é considerada dirigida e tri-dimensional, onde I é o conjunto de nós e A é o conjunto de arcos direcionados. Os aeroportos, pontos de transferência de controle e equipamentos de auxílio à navegação (*nav aids*) são considerados os nós da rede. Rotas e corredores de aproximação são considerados arcos direcionados. Os voos fluem ordenadamente através dos arcos direcionados entre os nós.

Na rede, o aeroporto e os pontos de transferência de controle que interligam rotas de sentido único são modelados como um par de nós origem e destino, respectivamente. Os auxílios à navegação (*nav aids*) que interligam rotas bi-direcionais são simples nós destino ou nós origem. Os *nav aids* conectam segmentos de rotas cujos vértices não são origem nem destino.

Na área de controle, o percurso do voo descrito pelo plano de voo é expresso por um conjunto de arcos direcionados que conectam os nós origem e destino que formam uma sequência dirigida chamada de caminho principal ou cadeia principal do voo. Em geral, na elaboração dos planos de voo, são definidos alguns aeroportos alternativos, deste modo, podem existir várias cadeias possíveis ou caminhos possíveis de arcos direcionados que representam as rotas alternativas para o mesmo voo.

Conforme as diferenças nos planos de voo, definem-se categorias de fluxos. Fluxos que têm as mesmas cadeias possíveis pertencem à mesma categoria.

Para expressar o modelo dinâmico, o intervalo de tempo $[0, T]$ é subdividido no $N + 1$ com tempo $t_0 = 0, t_1, \dots, t_N = T$ e a capacidade do arco (i, j) é definida como $C_{i,j}(t_n)$ com $n = 0, 1, \dots, N$ que expressa o limite superior admitido de entrada de fluxo do arco (i, j) entre os tempos t_{n-1} e t_n .

O modelo define nós fontes (*source nodes*) como os pontos de entrada de transferência ao longo de cada rota na área de controle, onde aeronaves que voam de fora entram na área de controle. Os nós destino (*sink nodes*) são definidos como pontos de transferências onde aeronaves voam para fora da área de controle.

3.3.2 Pesquisas Direcionadas para o Aeroporto

As pesquisas apresentadas nesta subseção trazem as preocupações dos pesquisadores para proporcionar mecanismos eficazes de gerenciamento de serviços do aeroporto. Foram relacionados os seguintes trabalhos: Controle Ótimo de Operações Aeroportuárias com restrições de capacidade Portão (KHADILKAR; BALAKRISHNAN, 2013), Otimização do Táxi de Aeroporto baseada em Algoritmo Genético (LIU; GUO, 2010) e Logísticas de Aeroporto - Modelando e Otimizando o processo *Turn-Around* (NORIN, 2008).

(i) Controle Ótimo de Operações Aeroportuárias com restrições de capacidade Portão

O trabalho de Khadilkar e Balakrishnan (2013) propõe uma estratégia para controlar a liberação de partida de voos a partir de seus portões, com o objetivo específico de reduzir seus tempos de táxi e consumo de combustível. A estratégia deixa claro as limitações que surgem devido à restrição dos recursos do portão do aeroporto.

O trabalho adota uma abstração em rede para as operações do aeroporto. Um portão é uma baia na vaga de estacionamento por onde os passageiros embarcam e desembarcam na aeronave. Uma coleção de portões próximos é chamado de terminal. O modelo em rede é composto de portões, como origem da rede; pistas principais de táxi, como arcos da rede e pistas de pouso e decolagem, como destino ou sumidouro da rede.

Um conjunto de processos aleatórios é empregado para modelar as operações de táxi das aeronaves. O tempo de táxi de cada aeronave, em cada arco da rede, é a soma de duas variáveis aleatórias: 1) O tempo de táxi desimpedido e 2) o tempo de táxi parado. O tempo de táxi esperado em cada arco da rede aumenta com o congestionamento, ou seja, o número de partidas da aeronave que já se encontra na superfície quando a aeronave atual deixa seu portão. Este número é denominado no trabalho como o nível de tráfego de superfície, k . Para cada arco l , a expectativa de tempo de táxi t_l para um dado nível

de tráfego de superfície é dado pela Equação 3.3.1:

$$\mathbb{E}[t_l|k] = \eta_l + k \frac{X_l}{\mu_l} \quad (3.3.1)$$

onde η_l é a constante que denota o tempo de táxi através do arco l quando $k = 0$, isto é, o tempo desimpedido esperado. O termo $\frac{X_l}{\mu_l}$ é também constante. O tempo esperado de cada parada individual no arco da rede é dado por $\frac{1}{\mu_l}$, enquanto X_l define a sensibilidade ao número de paradas no nível de tráfego de superfície. O tempo total de espera de táxi para uma determinada aeronave é calculado pela soma dos tempos de táxi esperados em todos os arcos da rede em seu caminho. O caminho de táxi é atribuído pelo controlador de tráfego aéreo, e presume-se ser conhecido de antemão.

Para o cálculo do tempo ideal de liberação, a estratégia proposta no trabalho emprega programação dinâmica.

A estratégia de solução foi testada com dados do Aeroporto Internacional Logan de Boston.

No trabalho, ficou demonstrado através de simulações, que a solução reduziu significativamente os tempos de táxi em situações nas quais as chegadas de aeronaves são atrasadas em razão da espera de liberação de um portão.

(ii) Otimização do Táxi de Aeroporto baseada em Algoritmo Genético

O artigo de Liu e Guo (2010) apresenta um método de programação genética para resolver problemas de taxiamento seguro de aeronaves por meio de um modelo com três tipos de restrições de conflito.

O método de codificação proposto considera o número de trajetória como gene de cromossomo para manter uma solução viável após o cruzamento e a mutação.

No problema de otimização de taxiamento de aeronaves, conforme a escala de voo, todas as chegadas e partidas de voos necessitam determinar uma rota viável para obter o menor tempo ou caminho mais curto de taxiamento sob condição prévia de evitar tipos de conflitos.

No trabalho, verificou-se que a solução proposta é válida para evitar conflitos de taxiamentos além de elevar a eficiência na ocupação do aeroporto.

(iii) Logísticas de Aeroporto - Modelando e Otimizando o processo *Turn-Around*

No trabalho de Norin (2008), a autora trabalha a otimização do fluxo de caminhões de

degelo (*de-icing*) das aeronaves, que é o processo de remoção de gelo e neve do corpo da aeronave, bem como aplicação de produtos para prevenir nova formação de gelo. O fluxo de caminhões de degelo é um dos fluxos secundários do processo que ocorre desde o pouso da aeronave até a sua decolagem, que é denominado de processo *Turn-Around*. Segundo a autora, o processo *Turn-Around* refere-se a todas as atividades que afetam a aeronave enquanto esta estiver no solo. Neste processo, quase todos dos atores que operam no aeroporto estão envolvidos. O processo é conectado a outras atividades que acontecem na área de movimento (área de manobras e os pátios - *airside*), no terminal de cargas ou passageiros, como também na torre de controle.

O tempo associado ao processo *Turn-Around* é definido como o tempo entre o pouso e a decolagem da aeronave.

Na rede baseada em atividade dirigida, desenvolvida no trabalho, os nós representam pontos relativos no tempo e os arcos representam atividades dentro do processo.

Como exemplo, as seguintes atividades encontram-se presentes na rede estabelecida por [Norin \(2008\)](#) e as entidades responsáveis pela atividade:

- **Sequenciamento:** Estabelecer o ordenamento de decolagem. A entidade responsável por esta tarefa é a Torre de Controle que faz parte do Serviço ATC;
- **Check in:** Verificação de passageiros. São entidades responsáveis por esta tarefa, a companhia de controle de solo e o aeroporto, ou seja, trata-se basicamente da infraestrutura do aeroporto;
- **Controle do peso e balanceamento:** A entidade responsável por esta tarefa é tripulação no *cockpit* da aeronave que representam a empresa aérea.

Estas são algumas atividades do processo *turn-around* descritas no trabalho de [Norin \(2008\)](#). Mais detalhes podem ser obtidos na obra original da autora.

[Norin \(2008\)](#) faz toda a conceituação e simulação computacional do modelo para concentrar-se na busca por solução para o planejamento e escalonamento de caminhões de degelo, que é um dos fluxos de suporte secundários do processo *turn-around*. A autora escolheu o fluxo de *De-icing* por considerá-lo como o fluxo de maior complexidade entre os fluxos de suporte secundário do processo como um todo, pois a atividade de degelo tem que ser feita com um certo tempo antes da decolagem, tempo este denominado *hold-over time*, afim de garantir que o produto que impede a formação de novo gelo ainda esteja ativo. Com exceção do intervalo *hold-over time*, o fluxo degelo é similar aos demais fluxos de suporte secundários.

O problema do fluxo de suporte secundário dentro do aeroporto relaciona-se com roteamentos otimizados de uma frota existente com número fixo de veículos.

No trabalho, foi mostrado que a solução proposta minimiza o tempo de viagem para os caminhões, bem como o atraso que o procedimento de degelo causa à aeronave.

3.3.3 Pesquisas Direcionadas para Empresas Aéreas

Nesta seção, os trabalhos apresentados concentram suas preocupações em propor metodologias para otimizar os serviços de empresas aéreas. Foram relacionados os seguintes trabalhos: Busca de rupturas na programação da linha aérea (QUANSHENG *et al.*, 2013), Otimização por Enxames de Partículas para Problema de Escalonamento de Tripulação (LIMLAWAN; KASEMSONTITUM; JEENANUNTA, 2011) e Simulação de multiagentes na utilização do espaço aéreo na presença das linhas aéreas (CALDERÓN-MEZA; SHERRY.; CONSIGLIO, 2009).

(i) Busca de rupturas na programação da linha aérea

O trabalho de Quansheng *et al.* (2013) busca recuperar a programação de voos por meio de uma rede recuperação com emprego de fluxo *multi-commodities*. Segundo os autores, é muito difícil que a programação da escala para os voos se cumpra, em face da imprevisibilidade dos cenários. Portanto, falhas mecânicas na aeronave, severidade do tempo, doença na tripulação e segurança estão entre os problemas que forçam uma companhia aérea atrasar ou até mesmo cancelar os seus voos regulares publicados. Isto determina uma interrupção na programação originalmente estabelecida.

O trabalho propõe um rede de recuperação, cujo objetivo é controlar a aeronave no tempo e no espaço. A rede pode gerar todos novos caminhos da aeronave por meio de adição de arcos de voo e arcos de atraso na rede. Então, é possível selecionar a rota que tem o custo mínimo.

No trabalho, verificou-se que o método para busca de rupturas na programação da escala de voos é correto, levando em conta que ao mudar o intervalo de tempo, a rede vai mudar significativamente.

(ii) Otimização por Enxames de Partículas para Problema de Escalonamento de Tripulação

O trabalho de (LIMLAWAN; KASEMSONTITUM; JEENANUNTA, 2011) propõe um método de otimização do processo de *Rostering* da tripulação. Este processo consiste na elaboração de uma lista que define a escala da tripulação para cada tripulante com res-

peito a restrições e regras, tais como quantidade máxima de horas de trabalho. O método proposto busca alinhar saúde ocupacional com políticas de segurança. Um escalonamento de tripulação consiste em que uma equipe de voo esteja presente em uma sequência ininterrupta de voo. O principal objetivo do problema de *Rostering* é balancear a carga de trabalho do tripulante.

Os autores comentam que o problema de *Rostering* de tripulação é um problema de otimização combinatória. O problema é de difícil solução para se alcançar otimização em uma quantidade limitada de tempo, pois o amplo tamanho do problema e complexidade do conjunto de restrições representam obstáculos na obtenção de soluções de bom desempenho (LIMLAWAN; KASEMSONTITUM; JEENANUNTA, 2011).

O número adequado de populações investigadas e os resultados mostraram que a menor quantidade de partículas é 10. Baseado nos resultados, a solução proposta que usa 10 partículas pode resolver o problema de *rostering* em aproximadamente 15 segundos.

(iii) Simulação de multiagentes na utilização do espaço aéreo na presença das linhas aéreas

O artigo de Calderón-Meza, Sherry. e Consiglio (2009) faz referência à saturação da capacidade do Sistema de Espaço Aéreo dos Estados Unidos (*U.S. National Airspace System - NAS*) que consumiu grandes investimentos de um Sistema de Controle de Tráfego Aéreo modernizado, conhecido como NextGen.

O artigo descreve uma simulação multiagentes para estratégias de seleção de rotas de linhas aéreas com vista a alternar rotas transcontinentais. Conforme os autores comentam, muitos pesquisadores assumem que as linhas aéreas atuam como “agentes racionais” (RUSSELL; NORVIG, 2003) e buscam maximizar seus ganhos individuais. Este comportamento individualista dos agentes pode conduzir o sistema a uma forma de resultado que é conhecida da Teoria do Jogos como Equilíbrio de Nash (NASH, 1950b), onde nenhum dos agentes (jogadores) muda voluntariamente sua estratégia até ter um incentivo para tal.

Os autores comentam que pesquisadores mostram que, em alguns “jogos”, os interessados podem obter melhor desempenho que o Equilíbrio de Nash, caso os agentes compartilhem informações (MARTIN *et al.*, 2001). Segundo os autores, propostas de tecnologias para o NextGen proverão mais informações em tempo real aos interessados, o que poderia conduzir a estratégias adaptáveis de linha aérea, levando, possivelmente, à sobrecarga temporal da escala ou subutilização da infraestrutura ATC (FERBER, 1999).

Os autores identificaram a existência de um equilíbrio natural por meio do intercâmbio entre utilização da infraestrutura ATC com custos operacionais de linha aérea sobre um

escopo de distância de rotas alternadas, estrutura de custos de linhas aéreas e estratégias de linhas aéreas. Os autores buscaram mostrar justamente que estratégias diferentes da estratégia *First-Come/First-Serve* podem melhorar a utilização do sistema e manter custos baixos.

A estratégia de um agente *voo* é modelada conforme a Equação 3.3.2:

$$i = \arg \min_i [\varphi * c_f * d(r_i) + (1 - \varphi) * c_w * q(r_i)] \quad (3.3.2)$$

onde r_i é a i -ésima rota, φ é a variável de controle, de modo que $\beta \leq \varphi \leq \alpha$; $d(x)$ é a distância da rota x ; $q(x)$ é o tamanho da fila de entrada para a rota x ; c_f é o custo de voar um *slot* de distância e c_w é o custo de espera por um *slot* de tempo.

Os parâmetros β e α modelam a política de uma linha aérea sob as condições de que $0 \leq \beta$ e $\alpha \leq 1$. A mudança dos valores desses parâmetros para cada linha aérea permite que várias combinações de políticas possam ser simuladas. Um agente *voo* pode usar qualquer valor de φ permitido pela política, o que habilita várias estratégias de seleção de rotas variando φ . Com $\varphi = 0$ tem-se a estratégia *First-Come/First-Serve*, onde o agente *voo* decide baseado no tamanho da fila de espera. Com $\varphi = 1$ a decisão do agente *voo* baseia-se na distância da rota. Com $\varphi = 0.5$ os critérios de decisão consideram com mesma relevância o tamanho da fila de espera e a distância da rota. O ajuste dos parâmetros α e β tal que $\alpha = \beta$ força que a mesma estratégia, isto é, a estratégia de ponto único (*single point strategy*), seja adotada por todos os voos da linha aérea.

No modelo proposto do trabalho, as aeronaves são agentes racionais (RUSSELL; NORVIG, 2003) e suas decisões são baseadas apenas em informação local. As decisões dos agentes desconsideram informações globais do sistema, informações históricas ou futuras.

Os experimentos foram conduzidos com o uso da plataforma de simulação multiagentes de eventos discretos MASON (LUKE *et al.*, 2004), que é uma biblioteca em linguagem Java, projetada e implementada na Universidade George Mason.

No modelo, cada agente *Linha Aérea* define a política para seus voos. Cada agente *voo* define seus pesos no momento de sua criação, questionando o agente *Linha Aérea* sobre qual é política atual e escolhendo aleatoriamente a partir do escopo dessa política. No estudo, existem 90 agentes *voo*, porque cada linha aérea tem uma escala com 30 voos.

Após os testes, o trabalho conclui que sob o ponto de vista da utilização, a estratégia que resulta em menor subutilização de *slots* de rotas consiste em escolher rotas baseadas na fila de espera mais curta, determinado por $\varphi = 0.0$. Isto ocorre mesmo quando as distâncias das rotas diferirem de maneira significativa. No entanto, não há diferença

entre as estratégias quando a razão de distância é 1.0.

Ainda nas conclusões, os autores relatam que, sob o ponto de vista do custo agregado de linha aérea, a melhor estratégia usa baixos valores de φ . Conforme os testes, existe uma exceção quando a razão esperar/voar é baixa e a razão de distância desvia muito de 1.0. Neste caso particular, é melhor usar valores altos de φ para os voos. Um aumento na razão esperar/voar apenas acentua a diferença entre estratégias. Entretanto não se altera o fato de que usar valores mais baixos de φ geralmente proporciona custos mais baixos do que altos valores de φ .

Já ao final do artigo, os autores comentam que a maior contribuição de seu trabalho diz respeito a terem concluído que a estratégia FCFS, onde $\varphi = 0.0$ é geralmente eficiente ao determinar rotas de voo, salvo por algumas exceções, quando a razão esperar/voar é baixa e a razão de distância difere significativamente de 1. Para estes casos especiais, a eficiência será maior usando valores altos de φ .

3.3.4 Pesquisas em Jogos *Satisficing*

A Teoria dos Jogos *Satisficing* tem sido utilizada na abordagem para solução de problemas em campos diversos. Esta subseção resgata pesquisas que utilizaram esta abordagem nas soluções propostas.

A Tabela 3.4 apresenta a listagem dos trabalhos em Jogos *Satisficing* abordados nesta subseção. Cada linha da Tabela 3.4 contém o campo de pesquisa e o trabalho com autores e ano.

Tabela 3.4 – Trabalhos que empregam abordagem em Jogos *Satisficing*

Campo de pesquisa	Trabalho
ATFM	A Collision Avoidance Method based on Satisficing Game Theory (XIAOHUI; XUEJUN; XIANGMIN, 2012)
Tráfego Urbano	Urban Traffic Network Control by Distributed Satisficing Agents (LIMA; CAMPONOGARA, 2012)
Teoria dos Jogos	Attitude Adaptation in Satisficing Games (NOKLEBY; STIRLING, 2009)
ATFM	A Satisficing Approach to Aircraft Conflict Resolution (ARCHIBALD <i>et al.</i> , 2008)

(i) Um método anticollisão baseado em Teoria dos Jogos *Satisficing*

O trabalho sob o título original *A Collision Avoidance Method based on Satisficing Game Theory* (XIAOHUI; XUEJUN; XIANGMIN, 2012) propõe uma abordagem descentralizada e baseada em agentes para resolução de conflitos de aeronaves com emprego da

Teoria dos Jogos *Satisficing*. No método proposto, cada aeronave pode receber informações sobre outras aeronaves ao seu redor para decidir se deve mudar sua trajetória de voo e eliminar conflitos com outros, bem como, a maneira de realizar esta manobra. Além disso, as restrições do ambiente do espaço aéreo e obstáculos na trajetória são também considerados.

Para o Modelo de Anticolisão, supõe-se que A é o conjunto de aeronaves operando no espaço aéreo e cada aeronave A_i pertence ao conjunto A . Para descrever a resolução para evitar colisão, definem-se duas separações: R_1 que representa a distância de proximidade e R_2 que representa a distância de colisão. Normalmente, estas distâncias são 5 milhas náuticas e 300 pés, respectivamente (TOMLIN; MITCHELL; GHOSH, 2001).

O modelo determina que se em qualquer ponto do tempo for possível detectar que a distância entre as aeronaves A_i e A_j está próxima de R_1 , então existe conflito; Se a distância está muito próxima de R_2 , então A_i e A_j encontram-se em risco de colisão.

Para a solução de conflitos entre aeronaves, admite-se que todas as aeronaves voam na mesma altitude com velocidade constante. Uma vez a cada segundo, cada aeronave executa uma das seguintes manobras direcionais (ARCHIBALD *et al.*, 2008): Voar reto, curvar moderadamente (2,5 graus) à esquerda ou à direita, curvar acentuadamente (5,0 graus) à esquerda ou à direita.

Cada aeronave está equipada com equipamento que permite detectar a posição de outras aeronaves em um raio de 50 milhas náuticas. Quando o conflito é detectado, a resolução é executada da seguinte forma: Primeiramente, a aeronave A_i ordena todas as aeronaves dentro de seu raio, conforme tempo de voo, atraso e proximidade do destino, além de recuperar o conjunto de prioridade P_i que inclui todas as aeronaves com classificação mais alta que A (ARCHIBALD *et al.*, 2008).

O segundo passo envolve calcular a utilidade de rejeitabilidade social p_{R_i} e utilidade de seletibilidade p_{S_i} . A rejeitabilidade é representada da seguinte forma: U_C representa o controle atual e $d(i, j)$ é a distância projetada a partir da posição atual de A_i até o ponto de aproximação máxima $A_i \in P_i$. A variável $d_{min}(i, j)$ indica a menor distância entre A_i e A_j em seus caminhos projetados. Tem-se então, conforme a Equação 3.3.3:

$$P_{R_i}(U_1) \propto \sum_{A_j \in P_i} W_R(A_i(U_C), A_i(U_1)) \quad (3.3.3)$$

Na Equação 3.3.3, o símbolo \propto significa proporcionalidade. A função de peso W_R é

definida pela Equação 3.3.4:

$$W_R(A_i(U_C), A_i(U_1)) = \begin{cases} 2\alpha, & \text{se } d_{min} \leq R_2 \\ \alpha, & \text{se } R_2 < d_{min} \leq R_1 \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (3.3.4)$$

onde α na Equação 3.3.4 é definido conforme a Equação 3.3.5:

$$\alpha = \begin{cases} \left(1 + \frac{R_{nm} - d_{min}(i, k)}{R_{nm}}\right) \left(\frac{1}{d(i, k)}\right)^\beta, & \text{se } d(i, k) \leq 3R_{nm} \\ \left(\frac{1}{d(i, k)}\right)^\beta, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (3.3.5)$$

onde R_{nm} é o raio de distância em milhas náuticas atual entre as duas aeronaves.

Contrastando com a rejeitabilidade, a seletibilidade é influenciada pelo destino de uma aeronave e as preferências de outras.

O terceiro passo, consiste na definição do conjunto *satisficing*, conforme a Equação 3.3.6:

$$\sum G = \{(u_i \in U) : p_{S_i} \geq p_{R_i}\} \quad (3.3.6)$$

A melhor opção possui ampla diferença entre valores de seletibilidade e rejeitabilidade, indicando o caminho mais curto até o destino, com menos risco de conflitos com outras aeronaves.

Quanto à resolução para evitar colisão com obstáculos, no modelo, d_{min} é a menor distância projetada a partir do centro do obstáculo até a trajetória de voo da aeronave A_i . A rejeitabilidade social é alterada conforme a Equação 3.3.7:

$$P_{R_i}(u_1) \propto \sum_{A_j \in p_i} W_R(A_i(u_c), A_j(u_1)) + \sum_{o_i \in O} W'_R(A_i(u_c), o_i) \quad (3.3.7)$$

(ii) Controle de rede de tráfego urbano por agentes *satisficing* distribuídos

O artigo de Lima e Camponogara (2012) apresenta uma técnica de controle de horizonte deslizante distribuído para controlar uma rede de tráfego urbano, de tal modo que os agentes coordenam a si mesmos empregando uma abordagem em jogos *satisficing*. Portanto, os agentes tentam alcançar um desempenho pelo menos maior que o seu nível de desempenho mínimo especificado, mas também, é muito importante que eles se auto coordenem para atingir uma solução satisfatória para todos os agentes. Quando os níveis

mínimos de desempenho dos agentes não são alcançados, a abordagem *satisficing* ainda permite a negociação entre agentes.

O trabalho contribui para o problema de controle de semáforos em dois aspectos: O primeiro é a definição do nível de desempenho e política de negociação; o segundo aspecto é o mecanismo de coordenação que encontra, de forma distribuída, o centro analítico da região onde os agentes são satisfeitos.

O Controle *satisficing* distribuído de tempos de sinais verdes dos semáforos obtém uma solução satisfatória global para toda a rede por meio de especificação dos agentes.

A modelagem busca um comportamento para os agentes executarem seus objetivos e restrições e também garantir, de forma distribuída, critérios específicos de desempenho global e individual.

Com base na Teoria dos Jogos *Satisficing* (STIRLING, 2003; STIRLING; FROST, 2007) os objetivos dos agentes são avaliados em índices relacionados a metas e índices relacionados a custos de energia ou recursos. As metas devem ser maximizadas e os custos minimizados. O comportamento dos agentes é estabelecido com base nestes índices e determinam a função de *Seletibilidade* f_S que indica a utilidade das ações com respeito ao objetivo e a função de *Rejeitabilidade* f_R que indica o custo associado às ações. Seletibilidade e Rejeitabilidade servem de base para dois tipos de agentes: Agentes egoístas e Agentes *satisficing*.

Segundo os autores, o mecanismo de coordenação por abordagem *Satisficing* aplicado a uma rede de tráfego urbano oferece vantagens quando comparado por outros mecanismos em abordagens clássicas, permitindo que o ajuste dos agentes seja baseado em parâmetros físicos ao invés de ajuste de pesos *ad hoc*. A definição de nível mínimo de satisfação dá sentido aos objetivos de controle; a política de negociação fornece um mecanismo para aliviar os objetivos de controle no caso de inviabilidade e é bastante flexível para acomodar outras estratégias; além de parecer ser mais robusto para modelar erro.

Os autores concluem que qualquer solução *satisficing*, não apenas o centro analítico, é boa o suficiente para deixar os agentes satisfeitos, e isto pode impactar na simplificação do algoritmo distribuído e redução do tempo de decisão.

(iii) Uma abordagem para adaptação de atitude de agentes em jogos *satisficing*

O trabalho de Nokleby e Stirling (2009) apresenta um método pelo qual uma população de jogadores pode adaptar suas atitudes para melhorar seus ganhos (*payoff*), considerando que jogadores *satisficing*, com atitudes contraditórias, adotam comportamentos disfuncionais, levando a baixos resultados de desempenho. O trabalho também estende o conceito

de equilíbrio de Nash para jogos *satisficing*. As ideias do trabalho foram aplicadas ao conhecido jogo *Caça ao Cervo*, onde a cooperação não evolui tão facilmente a partir da não-cooperação.

A Teoria dos Jogos *Satisficing* (STIRLING, 2003) mostra-se como uma alternativa à Teoria dos Jogos Não-Cooperativos para sintetizar agentes artificiais focados em interações sociais entre os jogadores. As utilidades dos jogadores são expressadas em termos de funções de massa condicionais que os capacitam a considerar as preferências dos outros jogadores no lugar de concentrar somente no interesse individual.

Os modelos *satisficing* podem dotar os agentes de sofisticados comportamentos sociais como altruísmo, negociação e compromisso (ARCHIBALD *et al.*, 2006). No entanto, a Teoria dos Jogos *Satisficing* possui seus próprios desafios, como em situações sociais reais de comunidades *satisficing*, onde os jogadores com atitudes incompatíveis podem optar por comportamentos incoerentes que os levam a baixo desempenho.

Os autores comentam que dilemas sociais, como apresentado no jogo *Caça ao Cervo*, vêm sendo intensamente estudados por pesquisadores em diversas áreas, e muitos trabalhos recentes possuem foco em aprendizado baseado em Teoria dos Jogos Evolucionários (MAYNARD SMITH, 1974) para alcançar cooperação. No entanto, Nokleby e Stirling (2009) argumentam que o jogo *Stag-Hunt* apresenta dificuldades consideráveis quando baseado em uma perspectiva evolucionária, pois sob um replicador dinâmico padrão, que define um sistema de equações diferenciais ordinárias para governar a população, uma população primariamente com caçadores de lebre não pode evoluir para um grupo de caçadores de cervos. Uma razão para esta falha é que: “Para o caçador de lebre decidir se tornar caçador de cervo, cada um deve mudar suas crenças sobre o que os outros farão” (SKYRMS, 2001).

No método proposto, a população de jogadores pode modificar suas atitudes conforme a estrutura do jogo e as atitudes de outros jogadores. O método emprega o replicador dinâmico padrão. Os jogadores cujas atitudes resultam em *payoffs* mais altos se reproduzem mais prontamente, fazendo com que suas atitudes dominem a população. O modelo resultante combina duas teorias de decisão: os jogadores retêm a estrutura de utilidade condicional de Teoria dos Jogos *Satisficing* enquanto melhoram o *payoff* através de meios evolutivos. A dinâmica conduz os jogadores para o Equilíbrio de Nash nas atitudes dos jogadores no lugar de suas ações.

(iv) Uma abordagem *satisficing* para resolução de conflitos de aeronaves

O trabalho de Archibald *et al.* (2008) apresenta um *framework* para um sistema inteligente de suporte à decisão na resolução de conflitos de aeronaves. Na abordagem,

as aeronaves são vistas como agentes autônomos inclinados à tomada de decisões cooperativas. O *framework* baseia-se na Teoria dos Jogos *Satisficing* que permite modelar relações sociais complexas, onde agentes *satisficing* podem alinhar suas preferências individuais com as preferências de outros agentes, de modo a estarem comprometidos em metas individuais e de grupo.

O trabalho assume que cada aeronave está atenta a informações críticas como posição, velocidade e destino de outras aeronaves em um raio de 50 milhas. Assume-se também um espaço aéreo bidimensional onde as aeronaves mantêm altitudes iguais e velocidade constante. Os conflitos são evitados com mudanças de direção da proa das aeronaves. Uma vez a cada segundo, cada aeronave escolhe uma entre cinco opções direcionais, incluindo voar reto, curva moderada ($2,5^\circ$) à esquerda ou à direita e curva acentuada (5°) à esquerda ou à direita.

A Teoria dos Jogos estabelecida por [Neumann e Morgenstern \(1944\)](#) provê fundamentação lógica para tomada de decisão em ambiente multiagente, onde a maximização da utilidade esperada é o princípio fundamental que conduz boa parte da teoria, no entanto isto representa uma limitação, considerando que a otimização ocorre apenas em nível do indivíduo. Deste modo, se um grupo deseja otimizar seu comportamento, deve proceder como se fosse uma entidade isolada, mas a solução resultante pode não ser ótima, ou nem mesmo aceitável individualmente para seus membros. Em otimização individual, todo agente fará o melhor para si, sem considerar os efeitos de sua ação nos outros agentes. No entanto esta postura não é adequada para acomodar o tipo de comportamento cooperativo essencial à operação de um sistema ATC distribuído ([ARCHIBALD et al., 2008](#)). Para superar tal limitação, a formação de *utilidades sociais* como funções de *preferências por ação* do agente no lugar de diretamente funções de ação do agente.

Para isto, o agente desempenharia então dois personagens simultâneos, um que busca atingir a meta principal do problema de decisão, sem se importar com custos; o outro que se empenha em conservar recursos, reduzir custos, sem se preocupar em atingir a meta. O conflito entre os dois personagens descreve um agente decisor que precisa balancear desejo em atingir sua meta com o custo relacionado a este processo. Portanto, duas utilidades são necessárias para representar as preferências de cada personagem; uma representa a *seletibilidade* das opções disponíveis e a outra, representa a *rejeitabilidade* das opções. Tais utilidades são normalizadas como funções de massa.

O primeiro passo para aplicação da teoria *satisficing* é determinar, em termos gerais, como seletibilidade e rejeitabilidade são definidas para o problema de interesse. Considerando que seletibilidade reflete a realização do objetivo, e uma vez que o objetivo de

cada agente é chegar ao seu destino, a seletibilidade foi baseada sobre o quão diretamente a alteração do ângulo de proa resultante leva ao destino. A Rejeitabilidade foi utilizada para refletir as preocupações de segurança; a quantidade e o imediatismo de conflitos resultantes de uma determinada escolha direcional irão determinar o valor da função de rejeitabilidade para esta opção.

O próximo passo é determinar qual informação a partir de qualquer outra aeronave será usada no processo de decisão local para cada agente. As relações entre os agentes do sistema são representados por grafos acíclicos dirigidos retratando o *fluxo de influência*. Em razão do conjunto de potenciais aeronaves conflitantes variar no tempo, os fluxos de influência estáticos não são representados de forma acurada no sistema. Na abordagem, foram criadas situações específicas de fluxos de influência para fazer com que cada agente considere as direções de proa preferenciais da aeronave com classificações mais elevadas. Recalculado em cada passo de tempo, a classificação é determinada por atraso, tempo de voo e a proximidade de destino. Cada aeronave primeiramente particiona o conjunto de aeronaves *visíveis* (aquelas dentro de 50 milhas náuticas) em dois subconjuntos: aquelas dentro de 5 milhas náuticas de seu destino e todas as demais. Aeronaves que se encontram dentro do primeiro conjunto têm maior pontuação do que os do segundo conjunto. Dentro de cada conjunto, as aeronaves são classificados de acordo com atraso, onde o maior atraso reflete a classificação mais alta. Finalmente, as aeronaves do mesmo conjunto com o mesmo atraso são classificados de acordo com o seu tempo atual em voo, com os horários de voos mais longos, resultando em uma classificação mais elevada. Assume-se no trabalho que o mecanismo de classificação resulta em uma prioridade exclusiva para cada aeronave, e que as ordenações de classificação de aeronaves conflitantes são consistentes do ponto de vista de todos os participantes.

Para determinar a seletibilidade quanto às opções de alteração da direção de proa, a cada passo de tempo, cada agente X_i cria um grafo de fluxo de influência, conforme mostra a Figura 3.4, que resume as influências diretas e indiretas de S_i e da auto seleção de X_i . O grafo inclui uma aresta S_i a partir de todos os pais de X_i - aeronave visível com classificação mais alta que X_i que poderia entrar em conflito com X_i para alguma escolha de mudança de direção de proa disponível. As auto seleções de outras aeronaves são usados porque elas refletem preferências de direção de proa das aeronaves. O conjunto dos pais de X_i constitui o seu conjunto de prioridades denotado por P_i . Elementos de P_i são indexados de 1 até $|P_i|$ e somente elementos deste conjunto influencia diretamente p_{S_i} . No cenário apresentado na Figura 3.4, três aeronaves com alta classificação estão dentro da área visível de X_i , dois dos quais estão em conflito com X_i , e portanto seu conjunto de prioridades com índices 1 e 2. A terceira aeronave, X_j , tem conflitos com ambos os

membros do conjunto de prioridades de X , porém não diretamente com X_i .

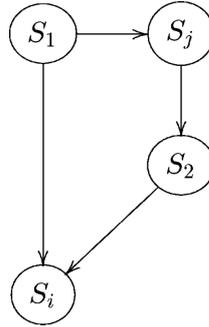


Figura 3.4 – Exemplo de grafo fluxo de influência para determinar a seletibilidade - Fonte: (ARCHIBALD *et al.*, 2008).

Na formulação proposta, a função de rejeitabilidade p_{R_i} reflete as preocupações com a segurança de X_i . Cada aeronave compara uma extensão linear de cada uma das opções direcionais $u_l^i, l = 1, \dots, |U|$ com projeções lineares das direções de proa atuais de todas as aeronaves em P_i . Cada conflito projetado adiciona um peso àquela opção, dependendo de sua distância medida em tempo e a severidade do conflito: Colisões são mais fortemente avaliadas em comparação com aproximações críticas. Após todas as classificações mais altas serem consideradas, o peso de cada opção é normalizado ao longo do espaço de opção e a função de massa é obtida.

Os detalhes para computar a rejeitabilidade social é a seguir descrito. Seja R_c e R_{nm} para denotar o raio de colisão e raio de proximidade, respectivamente, com $R_c \ll R_{nm}$. Seja u_c que representa a direção de proa corrente da aeronave, $d(i, k)$ é a distância projetada a partir da posição atual de X_i até o ponto de maior aproximação a $X_k \in P_i$, e $d_{min}(i, k)$ a menor distância entre X_i e X_k em seu caminho projetado. Então, conforme a Equação 3.3.8:

$$p_{R_i} \propto \sum_{X_k \in P_i} W_R(X_k(U_c), X_i(u_l)) \quad (3.3.8)$$

onde \propto significa proporcionalidade (Os pesos brutos são normalizados para, finalmente, criar uma função de massa). A função de peso W_R é definida pela Equação 3.3.9.

$$W_R(X_k(U_c), X_i(u_l)) = \begin{cases} 2\alpha, & \text{se } d_{min}(i, k) \leq R_c \\ \alpha & \text{se } R_c \leq d_{min}(i, k) \leq R_{nm} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.3.9)$$

onde α é definido conforme a Equação 3.3.10:

$$\alpha = \begin{cases} \left(1 + \frac{R_{nm} - d_{\min}(i,k)}{R_{nm}}\right) \left(\frac{1}{d(i,k)^\beta}\right), & \text{se } d(i,k) \leq 3R_{nm} \\ \left(\frac{1}{d(i,k)}\right)^\beta, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.3.10)$$

O parâmetro β é uma variável que foi ajustada experimentalmente e nos testes aplicados foi aplicado $\beta = 2/3$.

A função $W_R(X_k(U_c), X_i(u_l))$ aumenta o peso (e assim, a rejeitabilidade) das opções de alteração de direção de proa que levam a conflitos ou menor separação de outra aeronave. Se existem conflitos em todas as direções, a opção menos rejeitável será aquela com os conflitos mais distantes. Caso não existam conflitos para todas as opções de alteração de direção de proa, p_{Ri} é ajustado para uma distribuição uniforme, assim, as decisões subsequentes do agente dependem apenas da seletibilidade.

Contrastando com a rejeitabilidade, a seletibilidade é influenciada pelas preferências dos outros agentes. O primeiro passo para computar a seletibilidade é atribuir uma classificação $r(u_l)$ para cada opção de acordo com $|u_{dir} - u_l|$, onde u_{dir} é o ângulo de direção da proa da aeronave direto até o destino. As classificações para as cinco opções são atribuídas tal que $r(u_l)$ será 1 para a opção de direcionamento de proa mais próximo de u_{dir} e 5 para a opção mais distante de u_{dir} . Um peso $w_S(u_l)$ é então definido como uma função de $r(u_l)$ e da magnitude de $|u_{dir} - u_l|$, conforme a Equação 3.3.11.

$$w_S(u_l) = \begin{cases} 3, & r(u_l) = 1 \\ 2, & r(u_l) = 2 \\ 2, & r(u_l) = 3, \quad 2, 5^\circ < |u_{dir} - u_l| \leq 5^\circ \\ 1.1, & r(u_l) = 3, \quad 5^\circ < |u_{dir} - u_l| \\ 1.1, & r(u_l) = 4, \quad |u_{dir} - u_l| \leq 5^\circ \\ 1, & r(u_l) = 4, \quad 5^\circ < |u_{dir} - u_l| \\ 1.1, & r(u_l) = 5, \quad |u_{dir} - u_l| \leq 5^\circ \\ 1, & r(u_l) = 5, \quad 5^\circ < |u_{dir} - u_l| \end{cases} \quad (3.3.11)$$

Os pesos atribuídos são então normalizados sobre o espaço de opções de X_i para formar a função de massa $\sigma_{S_i}(u_l^i)$.

Apesar da aparente complexidade da definição anterior, apenas cinco funções de massa distintas podem ser construídas por este procedimento. Quando não há agentes que influenciam X_i , ou porque ele possui a mais alta classificação, ou porque não há aeronaves visíveis em conflito com ele, a seletibilidade $p_{S_i}(u^i) = \sigma_{S_i}(u_l^i)$. Caso contrário, $p_{S_i}(u^i)$ é

formada como uma combinação convexa de $\sigma_{S_i}(u^i)$ e outra função de massa $p_{S_i}(u^i)$, que considera a influência de outro agente. $p_{S_i}(u^i)$ é criada conforme se segue.

Para cada um de seus pais $X_k \in P_i$, X_i calcula uma matriz de pesos conforme a Equação 3.3.12.

$$W_{ik}(u_l^i, u_j^k) = W_S(X_i(u_l^i), X_k(u_j^k)), \quad k = 1, \dots, |P_i| \quad (3.3.12)$$

onde:

$$W_S(X_i(u_l^i), X_k(u_j^k)) \begin{cases} 1, & \text{se} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad d_{\min}(i, k) > R_{nm} \quad (3.3.13)$$

Assim, todos os pares de opções de alteração de direção de proa que não estão em conflito são atribuídos com peso de um. As colunas da matriz de pesos são então normalizadas conforme a Equação 3.3.14.

$$\sum_{u^i \in U} W_{ik}(u^i, u_j^k) = 1 \quad (3.3.14)$$

Seja u^{-m} , $m = 1, \dots, |U|^{|P_i|}$ um vetor de dimensão $|P_i|$ para representar uma escolha particular de alteração de direção de proa para cada uma das aeronaves em P_i , e seja $[u^{-m}]_k$ o k ésimo elemento do vetor. Então

$$\rho_{S_i|S_1, \dots, S_{|P_i|}}(u_l^i | u^{-m}) \propto \sum_{k=1}^{|P_i|} W_{ik}(u_l^i, [u^{-m}]_k), \quad m = 1, \dots, |U|^{|P_i|} \quad (3.3.15)$$

A seletibilidade marginal é computada somando todos os possíveis vetores u^{-m} conforme o desenvolvimento mostrado nas Equações 3.3.16 e 3.3.17.

$$\rho_{S_i}(u_l^i) = \sum_{m=1}^{|U|^{|P_i|}} \rho_{S_i|S_1, \dots, S_{|P_i|}}(u_l^i | u^{-m}) \cdot \hat{p}_{S_1}([u^m]_1) \cdot \hat{p}_{S_2}([u^m]_2) \dots \hat{p}_{S_{|P_i|}}([u^m]_{|P_i|}) \quad (3.3.16)$$

$$\rho_{S_i}(u_l^i) = \sum_{u^1 \in U} \sum_{u^2} \dots \sum_{u^{|P_i|}} \rho_{S_i|S_1, \dots, S_{|P_i|}}(u_l^i | u^1, \dots, u^{|P_i|}) \cdot \hat{p}_{S_1}(u^1) \cdot \hat{p}_{S_2}(u^2) \dots \hat{p}_{S_{|P_i|}}(u^{|P_i|}) \quad (3.3.17)$$

O cálculo da seletibilidade marginal $\rho_{S_i}(u_l^i)$ emprega o produto estimado de marginais ($\prod_{k=1}^{|P_i|} \hat{p}_{S_k}(u^k)$) no lugar da junção da seletibilidade real $p_{S_1, S_2, \dots, S_{|P_i|}}(u^1, \dots, u^{|P_i|})$ porque

os agentes são limitados a informação local, e nem a seletibilidade verdadeira, nem as seletibilidades marginais verdadeiras de outros agentes estão geralmente disponíveis. O valor estimado marginal $\widehat{p}_{S_k(u^k)}$ para todo $X_k \in P_i$ é calculado considerando os efeitos em X_k para todas as aeronaves em P_k que estão no campo de visão de X_i . A acurácia do modelo de X_i em p_{S_k} é dependente de quantos e quais os pais de X_k são visíveis por X_i . Obviamente, X_i não tem meios de saber o grau de sua lista de visibilidade e sobreposição de P_k , no entanto, como regra geral, quanto menor a distância entre X_k e X_i , maior a probabilidade dos membros de P_k estarem no conjunto de visibilidade de X_i . Assim, as estimativas de X_i são mais precisas para aeronaves que estão mais próximas, e portando de interesse mais imediato.

Finalmente, a função de massa de seletibilidade $p_{S_i}(u_i^i)$ é formada pela combinação convexa conforme a Equação 3.3.18.

$$p_{S_i}(u_i^i) = \lambda \sigma_{S_i}(u_i^i) + (1 - \lambda) \rho_{S_i}(u_i^i), \quad \lambda \in [0, 1]. \quad (3.3.18)$$

Todas as aeronaves para as quais $P_i = 0$ possuem $\lambda = 1$. Caso contrário, o parâmetro λ afeta o peso relativo dado para a opção de alteração de ângulo de proa percebida com as preferências de outra aeronave.

Uma vez que a aeronave X_i determinou sua seletibilidade e rejeitabilidade, é possível identificar o conjunto de opções *satisficing*. Geralmente, o conjunto *satisficing* não é unitário, pois uma variedade de regras de desempate podem ser empregadas. Por exemplo, agentes dispostos a tolerar riscos para elevar ganhos poderiam maximizar a seletibilidade. Agentes avessos a risco poderiam escolher minimizar a rejeitabilidade, mas isto não dá garantia de progredir para alcançar a meta. Para a aplicação proposta no trabalho de Archibald *et al.* (2008), a opção *satisficing* é selecionada com os maiores ganhos de diferença entre seletibilidade e rejeitabilidade, garantindo o maior progresso possível em direção à meta em relação ao risco incorrido.

Os autores concluem que a necessidade de novos algoritmos que automatizam a tomada de decisões continuará a crescer à medida que as densidades do tráfego aéreo aumentem. A teoria de decisão *satisficing* oferece um método atraente de modelagem e resolução de problemas multiagentes distribuídos que são inerentemente cooperativos como no caso do ambiente ATC. Soluções baseadas na teoria *satisficing* podem apresentar um comportamento complexo, ainda que sejam baseados em algoritmos relativamente simples que não são específicos para qualquer cenário fixo de problema.

3.4 FUNÇÕES DE PREFERÊNCIA DAS ENTIDADES

Esta seção tem por objetivo mapear e identificar as funções de preferência dos participantes envolvidos na tomada de decisão no contexto ATFM, como Serviço ATC, Empresas Aéreas e Gestor do Aeroporto. Cada entidade possui preocupações, ou preferências particulares sobre seu desempenho. Por exemplo, as empresas aéreas buscam gerenciar sua operação com redução de atrasos e custos. As funções de preferências listadas nesta seção foram eleitas por meio de reuniões entre pesquisadores do Laboratório de Modelos Computacionais para Transporte Aéreo que atuam em pesquisas direcionadas para entidades do ambiente de Gerenciamento de Tráfego Aéreo.

3.4.1 Funções de Preferências para Controle de Tráfego Aéreo

Conforme apresentado na Seção 3.2, o Serviço ATC visa garantir segurança do tráfego aéreo. Com isto, os congestionamentos no espaço aéreo, atrasos em voo e em solo são as preocupações desta entidade que serão apresentadas nesta subseção.

O Serviço ATC busca determinar a severidade dos congestionamentos nos setores de controle do espaço aéreo. Portanto, uma quantidade excessiva de aeronaves em um setor afeta a segurança global do sistema. A função $Cs(x)$ descrita pela Equação 3.4.1 retorna a severidade do congestionamento para cada setor x (CRUCIOL *et al.*, 2013):

$$Cs(x) = \Theta(V(x) - c)^{(V(x)-c)} \quad (3.4.1)$$

onde $V(x)$ é a quantidade atual de aeronaves no setor x , c é a quantidade máxima de aeronaves no setor x que não causa congestionamento, x é o setor sob análise, e a função Θ retorna zero, caso a entrada seja menor que zero. Caso contrário, retorna o valor da entrada.

Setores em situação de congestionamento determinam uma taxa elevada de transferência da TMA, onde o tempo de atraso é proporcional à severidade do congestionamento. Portanto, quanto maior o congestionamento, tanto maior é a taxa do índice Cs . Esta taxa é dada pela exponenciação do valor de congestionamento dado por $(V(x) - c)$.

Um setor é considerado congestionado quando a população de aeronaves atinge 80% de sua capacidade máxima (SOUZA *et al.*, 2008). Com isto, a variável c pode ser calculada

da seguinte forma:

$$c = \begin{cases} \lfloor N(x) \times 0.8 \rfloor, & \text{caso } \epsilon > 0 \\ \lfloor N(x) \times 0.8 \rfloor - 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

onde $N(x)$ é a capacidade de saturação, que é a quantidade de aeronaves que ocupa 100% da capacidade do setor x , ϵ é a parte fracionária do cálculo de 80% de $N(x)$, dado por $\epsilon = N(x) \times 0.8 - \lfloor N(x) \times 0.8 \rfloor$

Por outro lado, o Serviço ATC, por vezes, necessita aplicar medidas restritivas para melhor gerenciar o fluxo de aeronaves, conforme destacado na subseção 3.2.1. Aplicar uma medida de espera em solo reduz a quantidade de aeronaves que entram no espaço aéreo e isto alivia os congestionamentos. No entanto, os atrasos decorrentes desta medida desencadeiam impactos negativos à segurança com respeito a aeronaves em voo que precisam de espaço no pátio para pousar, além dos impactos na infraestrutura aeroportuária com o aumento da permanência de aeronaves em solo.

As duas funções a seguir retornam os atrasos totais de uma aeronave inserida no sistema.

O cálculo dos atrasos para uma aeronave em solo é dado pela Equação 3.4.2:

$$d_{Agh}(a) = \Theta(t - (\alpha(t_{As(a)}, t_{Aes}(a)))) \quad (3.4.2)$$

Para uma aeronave em voo, o cálculo dos atrasos é dado pela Equação 3.4.3:

$$d_{Aah}(a) = \Theta(t - (\alpha(t_{Ac(a)}, t_{Aec}(a)))) \quad (3.4.3)$$

Nas Equações 3.4.2 e 3.4.3, t é o horário corrente, t_{As} é horário atual de decolagem, t_{Aes} é o horário de decolagem originalmente estimado, t_{Ac} é o horário atual de chegada, t_{Aec} é o horário de chegada originalmente estimado e a é a aeronave.

A função α faz a estimativa da hora de decolagem ou de pouso (t_{Aes} ou t_{Aec}). A função Θ retorna zero, caso o valor de entrada for negativo. Isto implica que a aeronave não está atrasada. O total de atrasos para todas as aeronaves que se encontram no setor x é dado

pela Equação 3.4.4:

$$d_{Ath}(x) = \sum_{a \in x} (d_{Agh}(a) + d_{Aah}(a)) \quad (3.4.4)$$

3.4.2 Funções de Preferências para Empresas Aéreas

As empresas aéreas visam operar com redução de atrasos e de custos operacionais de seus voos. Um critério de satisfação para as empresas aéreas envolve a equidade entre elas, com vista em manter a ordem de chegada ao destino originalmente estabelecida (BERTSIMAS; GUPTA, 2009). Portanto, medidas restritivas que modifiquem esta ordem afetam os critérios de equidade entre as empresas aéreas e implicam em um grau de rejeição à medida adotada.

O impacto de uma medida restritiva de fluxo para empresas aéreas (CRUCIOL *et al.*, 2013) é estimado pela Equação 3.4.5:

$$I(z) = \sum_{x \in z} (J_{Ad}(x) + F_{Ath}(x)) \quad (3.4.5)$$

Onde $J_{Ad}(x)$ representa o impacto na distribuição dos atrasos totais de uma TMA x e $F_{Ath}(x)$ representa o impacto financeiro dos atrasos em uma TMA x

O impacto na distribuição dos atrasos (CRUCIOL *et al.*, 2013) é representado pela Equação 3.4.6:

$$J_{Ad}(x) = \sum_{a \in x} \left| 100 - \left(\frac{d_{Agh}(a) \times 100}{d_{Td}/\xi(TMA, t_0, t)} \right) \right| \quad (3.4.6)$$

onde, d_{Agh} representa os atrasos em solo imputados à aeronave a , d_{Td} é o total de atrasos em uma TMA e a função ξ retorna a quantidade de aeronaves que estão atrasadas naquela TMA no período entre t_0 e t .

Os atrasos nos voos causam custos financeiros extras para as empresas aéreas, em razão do custo operacional da aeronave, da queima adicional de combustível, das horas adicionais para tripulação, do cancelamento de voos e custos indiretos aos passageiros (BERTSIMAS; GUPTA, 2009; SOUZA *et al.*, 2009). O impacto financeiro é representado pela Equação 3.4.7:

$$F_{Ath}(x) = \sum_{a \in x} \Theta(d_{Ath}(a) - D(a))^{1+\Theta(d_{Ath}(a)-C(a))} \quad (3.4.7)$$

onde, $C(a)$ representa os atrasos em solo máximos antes de um voo ser cancelado, $D(a)$ representa os atrasos em voo máximos determinados pela reserva de combustível da aeronave (SOUZA *et al.*, 2009), $d_{Ath}(a)$ é o total de atrasos para a aeronave a . A função Θ retorna zero, caso a aeronave não estiver atrasada.

3.4.3 Funções de Preferências para Aeroportos

Com respeito à fluidez do tráfego aéreo, os recursos aeroportuários estão relacionados à capacidade de pouso de um aeroporto em um determinado instante (RIBEIRO; WEIGANG, 2013). Esta capacidade pode ser estimada por equações que informam a quantidade de pistas disponíveis e espaço disponível em pátio.

A quantidade de pistas de pouso e decolagem disponíveis no instante t (RIBEIRO, 2013) é dada pela Equação 3.4.8:

$$C_d(t) = I_p^r - (I_a(t) + I_d(t)) \quad (3.4.8)$$

onde I_p^r é a quantidade de pistas em funcionamento no aeroporto, $I_a(t)$ quantidade de pistas sendo utilizadas para pouso no instante t , $I_d(t)$ quantidade de pistas sendo utilizadas para decolagem no instante t .

A capacidade corrente de ocupação do pátio de um aeroporto (RIBEIRO; WEIGANG, 2013) é dada pela Equação 3.4.9:

$$C_o = I_p^f - \psi(F_g^-) \quad (3.4.9)$$

onde I_p^f é a quantidade de vagas no pátio do aeroporto para as aeronaves estacionarem e $\psi(F_g^-)$ é a quantidade atualizada de elementos do conjunto F_g^- de aeronaves em solo.

Com base nestas equações, a capacidade de pouso em um aeroporto no instante t (RIBEIRO; WEIGANG, 2013) é obtida pela Equação 3.4.10:

$$C_a(t) = \min \{C_o, C_d(t)\} \quad (3.4.10)$$

Por outro lado, a operacionalidade do aeroporto também diz respeito à capacidade dos serviços do terminal de passageiros (TPS). Dentro do terminal de passageiros, cada serviço pode ser avaliado segundo o método IATA - *International Air Transport Association* que determinam a capacidade de cada componente do terminal, como balcões de *check-in*, saguão de embarque e desembarque, controle de passaporte de embarque e desembarque,

inspeção de segurança em Raio X doméstico e internacional, sala de embarque doméstico e internacional, sala de restituição de bagagens doméstica e internacional e meio-fio para embarque e desembarque. No entanto, estes componentes devem estar acondicionados na área global do terminal (BANDEIRA; CORREIA, 2008). A FAA recomenda um índice global onde a área do TPS deve ter de $18 m^2$ a $24 m^2$ por passageiro na hora pico (pax/hp), onde se considera que é neste momento de solicitação intensa que se necessita manter o nível de operacionalidade.

A quantidade de passageiros por m^2 , que é o índice $O_{tps}(t)$ de ocupação do TPS no instante t , pode ser calculada pela Equação 3.4.11:

$$O_{tps}(t) = \frac{S_{tps}}{pax(t)} \quad (3.4.11)$$

onde S_{tps} é a área total do terminal e $pax(t)$ é a quantidade de passageiros presentes no terminal no instante t .

3.5 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Conforme exposto neste capítulo, o Serviço de Gerenciamento de Tráfego Aéreo apresenta diversos elementos estruturantes e entidades que atuam no cenário. O ambiente possui restrições de capacidades dos diversos elementos, mas para as considerações deste trabalho, coloca-se em evidência as capacidades aeronáuticas e aeroportuárias.

Além das infraestrutura e capacidades instaladas, o ambiente do Serviço de Gerenciamento de Tráfego Aéreo possui entidades que atuam no cenário buscando otimizar seu desempenho. Neste capítulo, foi possível resgatar os trabalhos de diversos autores que buscam abordagens distintas para atender as preferências de cada entidade. O capítulo apresentou também o resgate de iniciativas de trabalhos em jogos *satisficing* para o domínio ATFM, bem como para outros domínios.

As funções de preferência das entidades que modelam as preocupações de cada entidade foram mapeadas e selecionadas para servir de subsídio na elaboração do Modelo *Satisficing* como uma das etapas do desenvolvimento da Metodologia de gestão da tomada de decisão a ser vista no próximo capítulo.

4 METODOLOGIA DE GESTÃO DA TOMADA DE DECISÃO

4.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo apresenta a metodologia para contribuir na gestão da tomada de decisão composta de oito etapas que levam ao sequenciamento de voo para pouso ou decolagem conforme as operações de AHP e GDP respectivamente. As etapas da metodologia são as seguintes: 1) Mapear e definir as funções de preferência; 2) definição dos tipos de decisão; 3) elaborar o modelo *satisficing*; 4) definição das políticas de prioridade por tipo de operação e entidade; 5) definição de regras; 6) identificar todas as opções de decisão, 7) desenvolvimento do protótipo e 8) a tomada de decisão. A Figura 4.1 apresenta estas envolvidas na construção da metodologia proposta.

4.2 ETAPA 1 - MAPEAR E DEFINIR AS FUNÇÕES DE PREFERÊNCIA

Para contribuir na gestão da tomada de decisão, a etapa inicial é o mapeamento das preferências das entidades participantes do ambiente CDM. Estas preferências foram mapeadas por meio de um *brainstorming* entre pesquisadores do Laboratório de Modelos Computacionais para Transporte Aéreo da Universidade de Brasília - TRANSLAB, onde se levantou as funções que calculam valores de otimização individual de cada entidade. As funções de preferência mapeadas e selecionadas foram relacionadas anteriormente na seção 3.4. Estas funções foram escolhidas porque determinam o cálculo de severidade de congestionamento do espaço aéreo e cálculo acúmulo de atraso como preocupações do Serviço ATC; para as empresas aéreas, as funções mapeadas retratam como preocupações o cálculo da distribuição dos atrasos entre voos e impacto financeiro dos atrasos; por fim, como preocupações para o aeroporto, as funções calculam valores de congestionamento de pátio e ocupação do terminal de passageiros.

4.3 ETAPA 2 - DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE DECISÃO

Embora o serviço de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo admita a aplicação de dez tipos de medidas de restrição de fluxo de tráfego, somente as medidas de espera em solo (GDP) e espera no ar (AHP) foram consideradas neste trabalho, porque o ambiente de

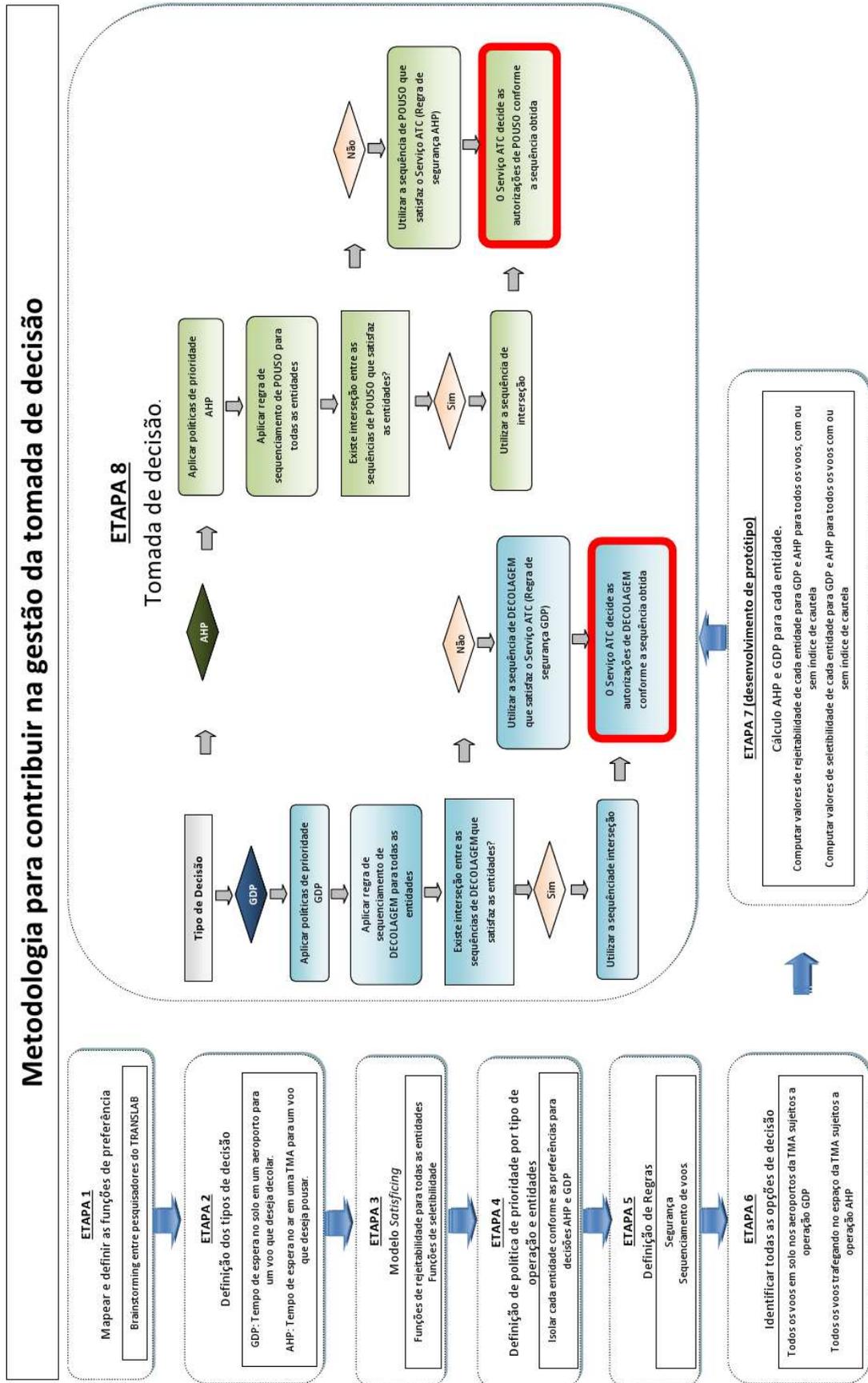


Figura 4.1 – Metodologia proposta para contribuir na gestão da tomada de decisão

decisões envolve a área terminal, isto é, são decisões que se aplicam geralmente quando os voos estão chegando ou saindo de aeroportos situados dentro dos limites da área terminal, portanto os voos que desejam decolar de algum aeroporto desta TMA estão sujeitos a decisões GDP, já os voos que chegam a algum aeroporto situado nesta mesma TMA estão sujeitos a medidas AHP. Deste modo, somente em casos muito extremos, como situações de alerta de perigo de acidentes, um voo poderia ser desviado para outro aeródromo dentro da área terminal ou mesmo fora dela, o que poderia se configurar na medida de “pouso e espera em aeródromos intermediários”. Convém ainda lembrar, que neste trabalho a sigla GDP está sendo empregada para representar tanto a medida de Programa de Atraso em Solo, quanto as medidas de espera em solo.

Definição dos tipos de decisão:

(i) **Decisão GDP:** Dado um voo $f_{dep} \in F_{dep}$, onde F_{dep} é o conjunto dos voos que aguardam decolar de um aeroporto A situado em uma TMA x , uma decisão GDP consiste em submeter o voo f_{dep} a um tempo t_{gdp} de espera em solo no aeroporto A .

(ii) **Decisão AHP:** Dado um voo $f_{arr} \in F_{arr}$, onde F_{arr} é o conjunto dos voos que aguardam pousar em um aeroporto A situado em uma TMA x , uma decisão AHP consiste em aplicar ao voo f_{arr} um tempo t_{ahp} de espera no ar na TMA x .

4.4 ETAPA 3 - ELABORAR MODELO *SATISFICING*

O processo de tomada de decisão *satisficing* em ATFM envolve buscar decisões satisfatórias para as entidades participantes do ambiente CDM. Esta satisfação das entidades consiste em calcular os índices de rejeição ou aceitação das decisões. Estes índices são obtidos por meio de funções de rejeitabilidade e seletibilidade das decisões para cada entidade.

Deste modo, dado um conjunto de opções $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, o modelo *satisficing* propõe definir valores $p_R(u)$ de rejeitabilidade e $p_S(u)$ de seletibilidade, tal que $u \in U$ (AHP ou GDP) para posteriormente extrair um conjunto $S = \{u \in U : p_S \geq p_R\}$, definido como conjunto *satisficing*. Este modelo *satisficing* para decisões AHP ou GDP considera as preferências das entidades, conforme pode ser melhor visualizado no diagrama da Figura 4.2:

(i) *Rejeitabilidade ATC*

Com respeito à Equação 3.4.1 de preferência para a entidade ATC, onde não admite quantidade de aeronaves maior que $N(x)$, a severidade máxima determinada pela satura-

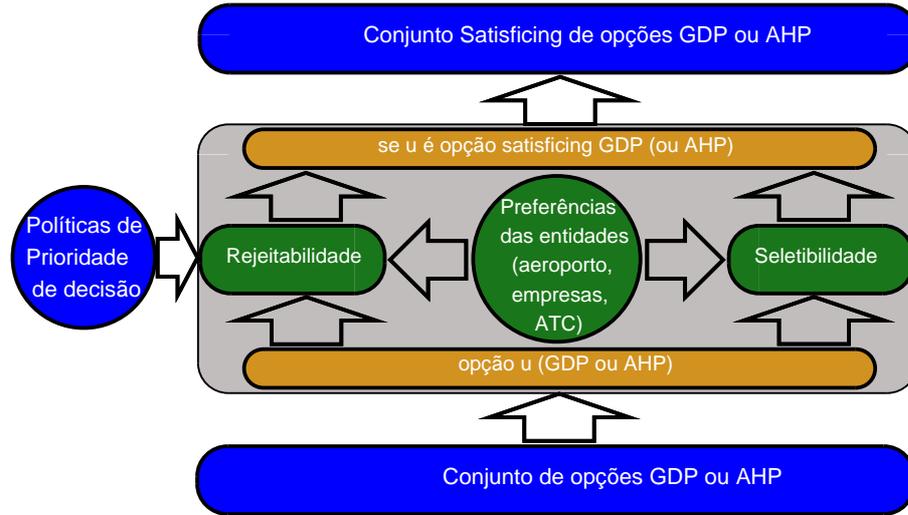


Figura 4.2 – Modelo *Satisficing* CDM.

ção do setor x é dada pela Equação 4.4.1:

$$Cs_{max}(x) = \Theta(N(x) - c)^{(N(x)-c)} \quad (4.4.1)$$

Na Equação 3.4.1 de preferência da entidade ATC, a variável $V(x)$ é substituída por $N(x)$, determinando que o setor x está saturado.

A rejeitabilidade do congestionamento relaciona-se à severidade máxima $Cs_{max}(x)$ para decisões GDP. Então, um primeiro valor de rejeitabilidade ATC pode ser obtido conforme a severidade do congestionamento se aproxima de $Cs_{max}(x)$, conforme a Equação 4.4.2:

$$p_{RC_C}(u) = \begin{cases} \frac{C_s}{Cs_{max}}, & \text{caso } c < V(x) \leq N(x) \\ 0, & \text{caso } V(x) \leq c \end{cases} \quad (4.4.2)$$

Por outro lado, quanto ao atraso das aeronaves, o ideal para o Serviço ATC, por razões de segurança, seria reduzir os tempos de procedimentos AHP. Com base nas equações de preferência ATC relacionadas a atrasos em setor de controle (ou TMA), o tempo dos atrasos totais de aeronaves em voo na TMA x é dado pela Equação 4.4.3:

$$d_{Aah}(x) = \sum_{a \in x} d_{Aah}(a) \quad (4.4.3)$$

Considerando os atrasos totais na TMA x , uma medida AHP $u \in U$ será mais rejeitável, quanto maior a variação dos tempos de procedimento AHP.

Deste modo, um segundo valor de rejeitabilidade ATC é obtido conforme a Equação 4.4.4:

$$p_{RD_C}(u) = \begin{cases} \frac{\Delta_{ahp}(x)}{d_{Aah}(x)}, & \text{caso } \Delta_{ahp}(x) > 0 \\ 0, & \text{caso } \Delta_{ahp}(x) \leq 0 \end{cases} \quad (4.4.4)$$

A variação dos tempos AHP na TMA x é definida por $\Delta_{ahp}(x) = d_{Aah}(x) - \vartheta(x, u)$, onde $d_{Aah}(x)$ é o atraso em voo atual e $\vartheta(x, u)$ é o atraso total em voo na TMA x que a decisão $u \in U$ produz.

(ii) *Rejeitabilidade das Empresas Aéreas*

Com base na Equação 3.4.6 de preferência das empresas aéreas, o valor $m_{t_0,t}$ é a distribuição igualitária do atraso acumulado na TMA entre as aeronaves atrasadas em solo no período t_0 e t conforme a Equação 4.4.5:

$$m_{t_0,t} = \frac{d_{Td}}{\xi(TMA, t_0, t)} \quad (4.4.5)$$

A rejeitabilidade da distribuição de atrasos para uma linha aérea está relacionada a aumento de atrasos em solo que ultrapassem o valor de $m_{t_0,t}$, para procedimentos GDP. Então, um primeiro valor de rejeitabilidade para a linha aérea é obtido conforme a Equação 4.4.6:

$$p_{RD_L}(u) = \begin{cases} \left| 1 - \left(\frac{d_{Agh}(a)}{m_{t_0,t}} \right) \right|, & \text{se } 0 < m_{t_0,t} < d_{Agh}(a) \\ 0, & \text{se } d_{Agh}(a) \leq m_{t_0,t} \leq 0 \end{cases} \quad (4.4.6)$$

A função de rejeitabilidade $p_{RD_L}(u)$ retornará zero, caso o atraso imputado à aeronave seja igual ou menor que o valor distribuição igualitária do atraso entre todas as aeronaves atrasadas na TMA entre os instantes t_0 e t .

Por outro lado, também existe rejeitabilidade financeira, conforme mostra a Equação 3.4.7 de preferência das empresas aéreas para impacto financeiro. Esta rejeitabilidade refere-se ao valor máximo de impacto financeiro produzido pelo atraso total da aeronave, portanto, o máximo que uma aeronave pode atrasar será o menor dentre os valores $C(a)$ e $D(a)$, subtraído de uma unidade, considerando que os tempos são medidos em minutos,

conforme a Equação 4.4.7:

$$d_{Athmax}(a) = \min(C(a), D(a)) - 1 \quad (4.4.7)$$

onde $C(a)$ e $D(a)$ são respectivamente, os atrasos em solo máximos antes do cancelamento do voo e os atrasos em voo máximos determinados pela reserva de combustível da aeronave.

Isto permite obter um segundo valor de rejeitabilidade para uma decisão, tanto AHP, quanto GDP, conforme a Equação 4.4.8:

$$p_{RFL}(u) = \frac{d_{Ath}(a)}{d_{Athmax}(a)} \quad (4.4.8)$$

(iii) *Rejeitabilidade do Aeroporto*

A sobrecarga nos serviços do Terminal de Passageiros - TPS pode representar um valor de rejeitabilidade para decisões GDP, na medida em que esta decisão promove aumento da ocupação de passageiros no TPS, conforme a Equação 3.4.11. Esta rejeição se reflete no acúmulo de passageiros com embarque programado para outros voos, cujo atraso no embarque foi induzido pela decisão $u \in U$. Com base nisto, uma decisão GDP para um voo f_0 pode causar atrasos de embarque no conjunto de voos $E_d = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. Portanto, a quantidade de passageiros acumulada no TPS induzida pela decisão $u \in U$ pode ser obtida pela Equação 4.4.9:

$$\varphi(t, u) = pax(t) + \sum_{i=1}^n pax(f_i(u)) \quad (4.4.9)$$

onde $pax(t)$ é a quantidade de passageiros no instante t , $pax(f_i(u))$ é a quantidade de passageiros do voo f_i com embarque atrasado induzido pela decisão $u \in U$. Deste modo, a Equação 3.4.11 de preferência da gestão do aeroporto pode ser reescrita conforme a Equação 4.4.10:

$$O_{tps}(t, u) = \frac{S_{tps}}{\varphi(t, u)} \quad (4.4.10)$$

Portanto, um valor de rejeitabilidade pode ser obtido conforme a Equação 4.4.11:

$$p_{RA}(u) = \begin{cases} \frac{S_{max} - O_{tps}(t, u)}{S_{max} - S_{min}}, & \text{se } S_{min} \leq O_{tps}(t, u) < S_{max} \\ 0, & \text{se } O_{tps}(t, u) \geq S_{max} \\ 1, & \text{se } O_{tps}(t, u) < S_{min} \end{cases} \quad (4.4.11)$$

onde $O_{tps}(t, u)$ é a ocupação do TPS no instante t dada pela Equação 3.4.11 que será produzida pela decisão GDP u , S_{max} é a área máxima adequada por passageiro na hora pico (pax/hp) e S_{min} é a área mínima adequada por passageiro na hora pico. Os valores de S_{max} e S_{min} estão afixados em $24 m^2$ e $18 m^2$ (pax/hp), respectivamente, conforme recomendação da FAA.

(iv) *Seletibilidade*

Algoritmos de fluxo máximo permitem calcular a quantidade máxima de aeronaves que povoam os setores de controle (ALMEIDA, 2010), no entanto, esta solução ótima nem sempre é possível diante da existência de múltiplas entidades decisoras no cenário aéreo. Deste modo, a seletibilidade de uma decisão é afetada pelo melhor fluxo de pousos ou decolagens que esta decisão pode ofertar. Então, por um lado, quanto menos espaço livre em uma TMA, mais selecionável será uma decisão GDP e um primeiro valor de seletibilidade $p_{S_{gdp}}(u)$ pode ser obtido pela Equação 4.4.12:

$$p_{S_{gdp}}(u) = \begin{cases} \frac{1}{N_x - (V_x(t) + 1)}, & \text{se } N_x > V_x(t) + 1 \\ 1, & \text{se } N_x \leq V_x(t) + 1 \end{cases} \quad (4.4.12)$$

onde N_x é a quantidade de aeronaves que podem trafegar na TMA x e $V_x(t)$ é a quantidade atual de aviões voando na TMA x no instante t .

Por outro lado, quanto menor a capacidade de pousos em um aeroporto, mais selecionável será a uma decisão AHP. Então, um segundo valor de seletibilidade $p_{S_{ahp}}(u)$ pode ser obtido pela Equação 4.4.13:

$$p_{S_{ahp}}(u) = \begin{cases} \frac{1}{C_a(t)}, & \text{se } C_a(t) > 0 \\ 1, & \text{se } C_a(t) = 0 \end{cases} \quad (4.4.13)$$

onde $C_a(t)$ é a capacidade de pouso do aeroporto no instante t .

As funções $p_{S_{gdp}}(u)$ e $p_{S_{ahp}}(u)$ retornam valores do contexto geral do ambiente ATFM onde as entidades se inserem, e são definidos dentro do modelo como valores de seletibilidade da fluidez ATFM.

(v) *Modelo Satisficing de Suporte à Decisão*

Considerando cada entidade isoladamente, sem qualquer regra ou política de prioridade de fluxo, as decisões *satisficing* das entidade concentram-se em conjuntos onde a seletibilidade é igual ou maior que a rejeitabilidade de cada entidade para decisões GDP

ou AHP. Isto determina a existência de dois conjuntos *satisficing*, um conjunto GDP *satisficing* e um conjunto AHP *satisficing*.

Por razões de notação, o conjunto U que engloba decisões GDP e AHP é desmembrado em dois conjuntos D e H , tal que $D \subset U$, $H \subset U$ e $D \cup H = U$, onde D é o conjunto de decisões GDP e H é o conjunto de decisões AHP.

(a) *Conjunto GDP Satisficing*

Os conjuntos *satisficing* para decisões de espera em solo (GDP) são definidos como $S_{gdp}(A)$, $S_{gdp}(L)$ e $S_{gdp}(C)$, para o gestor do aeroporto, das empresas aéreas e Serviço ATC, respectivamente.

O conjunto $S_{gdp}(A)$ engloba decisões GDP que beneficiam o gestor do aeroporto. São decisões *satisficing* para esta entidade, que consideram o nível de ocupação do terminal de passageiros, conforme a Equação 4.4.11. O conjunto $S_{gdp}(A)$ é definido conforme a Equação 4.4.14:

$$S_{gdp}(A) = \{u \in D : p_{S_{gdp}}(u) \geq q_A \cdot p_{R_A}(u)\} \quad (4.4.14)$$

O parâmetro q_A é o *índice de cautela* e quantifica o grau no qual o gestor do aeroporto está disposto a arriscar uma decisão GDP.

Os elementos do conjunto $S_{gdp}(L)$ são decisões GDP suficientemente boas para a companhia aérea. São decisões *satisficing* para a gestão da linha aérea que consideram aspectos de distribuição de atrasos e impactos financeiros, conforme as equações 4.4.6 e 4.4.8. O conjunto $S_{gdp}(L)$ é descrito conforme a Equação 4.4.15:

$$S_{gdp}(L) = \{u \in D : p_{S_{gdp}}(u) \geq q_L \cdot p_{R_L}(u)\} \quad (4.4.15)$$

onde $p_{R_L}(u) = \max(p_{RD_L}(u), p_{RF_L}(u))$ por se considerar que, no caso de espera em solo, a rejeitabilidade será o maior dentre os valores de rejeitabilidade de distribuição de atrasos $p_{RD_L}(u)$ e rejeitabilidade financeira $p_{RF_L}(u)$. O parâmetro q_L é o *índice de cautela* e quantifica o grau no qual o gestor da linha aérea está disposto a arriscar uma decisão GDP.

No conjunto $S_{gdp}(C)$, as decisões são satisfatórias para o Serviço ATC, que, no caso de decisões GDP, se alinham com a rejeitabilidade de congestionamento $p_{RC_C}(u)$ do espaço aéreo controlado, conforme a Equação 4.4.16.

$$S_{gdp}(C) = \{u \in D : p_{S_{gdp}}(u) \geq p_{RC_C}(u)\} \quad (4.4.16)$$

Portanto, uma decisão GDP *satisficing* para o cenário será uma decisão que atenda às três entidades, isto é, uma decisão que esteja na interseção dos conjuntos *satisficing* de decisões GDP de cada entidade. Com isto, o conjunto *satisficing* para decisões GDP é dado pela Equação 4.4.17:

$$S_{gdp} = S_{gdp}(A) \cap S_{gdp}(L) \cap S_{gdp}(C) \quad (4.4.17)$$

As decisões GDP *satisficing* envolvem as três entidades, pois o modelo trata a rejeitabilidade do aeroporto quanto à espera em solo, logo o conjunto *satisficing* para decisões de espera em solo (GDP) considera também essa entidade.

(b) Conjunto AHP *Satisficing*

Por outro lado, as decisões AHP concentram-se em conjuntos *satisficing* definidos como $S_{ahp}(L)$ e $S_{ahp}(C)$, para Empresas Aéreas e Serviço ATC, respectivamente.

As decisões AHP do conjunto $S_{ahp}(L)$ são decisões que satisfazem as preferências da companhia aérea. São decisões *satisficing* para a gestão da linha aérea que consideram os aspectos de distribuição de atrasos entre os voos. O conjunto $S_{ahp}(L)$ é definido conforme a Equação 4.4.18:

$$S_{ahp}(L) = \{u \in H : p_{S_{ahp}}(u) \geq p_{RD_L}(u)\} \quad (4.4.18)$$

As decisões AHP do conjunto $S_{ahp}(C)$ satisfazem as preferências do Serviço ATC e se relacionam com a rejeitabilidade de atrasos na TMA dada por $p_{RD_C}(u)$, conforme a Equação 4.4.19.

$$S_{ahp}(C) = \{u \in H : p_{S_{ahp}}(u) \geq p_{RD_C}(u)\} \quad (4.4.19)$$

Decisões AHP que atendam às Empresas Aéreas e ao Serviço ATC estão na interseção dos conjuntos *satisficing* AHP de cada uma destas entidades. O conjunto *satisficing* para decisões AHP é dado pela Equação 4.4.20:

$$S_{ahp} = S_{ahp}(L) \cap S_{ahp}(C) \quad (4.4.20)$$

O conjunto de decisões AHP *satisficing* considera somente as entidades Empresas Aéreas e o Serviço ATC, pois, neste caso, o modelo não considera rejeitabilidade do aeroporto para espera em procedimentos AHP, em razão desta espera no ar ter impacto

menor na ocupação do terminal de passageiros do aeroporto.

4.5 ETAPA 4 - DEFINIÇÃO DAS POLÍTICAS DE PRIORIDADE POR TIPO DE OPERAÇÃO E ENTIDADE

As políticas modelam a prioridade de decisões para cada entidade. Estas políticas de prioridade visam obter o valor de rejeitabilidade de uma decisão para cada entidade individualmente. A aplicação de uma política permite que a metodologia para contribuição na tomada de decisão possa identificar o efeito isolado quanto à rejeição de uma decisão AHP ou GDP em uma entidade específica.

As políticas são descritas conforme:

- (i) A política ρ_A determina prioridade para o gestor do aeroporto e retorna a rejeitabilidade a uma decisão $u \in U$ desta entidade;
- (ii) A política ρ_L determina prioridade para a gestão da linha aérea e retorna a rejeitabilidade a uma decisão $u \in U$ desta entidade;
- (iii) A política ρ_C determina prioridade para o Serviço ATC e retorna a rejeitabilidade a uma decisão $u \in U$ desta entidade.

4.6 ETAPA 5 - DEFINIÇÃO DE REGRAS

A metodologia proposta estabelece duas classes de regras: **regras de segurança** e **regras de sequenciamento**. Estas duas classes de regras são a seguir descritas.

4.6.1 Regras de Segurança

Na metodologia proposta, o conjunto *satisficing* para decisões GDP S_{gdp} é determinado pela interseção dos conjuntos *satisficing* das três entidades, conforme descrito na Equação 4.4.17. Neste mesmo raciocínio, o conjunto *satisficing* para decisões AHP S_{ahp} é determinado pela interseção dos conjuntos *satisficing* da entidade Empresa aérea e do Serviço ATC, conforme descrito na Equação 4.4.20. No entanto, a dinâmica da evolução e a imprevisibilidade do cenário de fluxo de tráfego pode levar a situações onde os conjuntos *satisficing* das entidades venham a ser disjuntos, isto é, $S_{gdp} = \emptyset$ ou $S_{ahp} = \emptyset$. Neste caso, como regras iniciais, são estabelecidas diretivas de segurança para os casos de conjuntos *satisficing* disjuntos (GDP ou AHP), onde prevalece o critério *satisficing* para o Serviço

ATC, pois as funções de preferências desta entidade visam garantir segurança do fluxo de tráfego.

Definição 4.1 *Regra de segurança para decisões GDP* - O conjunto GDP satisficing S_{gdp} conterá somente as decisões satisficing do Serviço ATC, caso S_{gdp} seja um conjunto vazio.

Formalmente, esta regra é definida conforme a Equação 4.6.1:

$$S_{gdp} = \{(\forall u \in D) \wedge S_{gdp} = \emptyset \rightarrow S_{gdp}(C)\} \quad (4.6.1)$$

onde D é o conjunto de decisões GDP, tal que $D \subset U$.

Esta regra permite garantir a segurança no processo de tomada de decisão de espera em solo quando os interesses individuais entrarem em conflito a ponto de não existir interseção entre os conjuntos *satisficing* de cada entidade. Neste caso, prevalecerá o conjunto *satisficing* para decisões GDP do Serviço ATC.

Definição 4.2 *Regra e segurança para decisões AHP* - O conjunto AHP satisficing S_{ahp} conterá somente as decisões satisficing do Serviço ATC, caso S_{ahp} seja um conjunto vazio.

Formalmente, esta regra é definida conforme a Equação 4.6.2:

$$S_{ahp} = \{(\forall u \in H) \wedge S_{ahp} = \emptyset \rightarrow S_{ahp}(C)\} \quad (4.6.2)$$

onde H é o conjunto de decisões AHP, tal que $H \subset U$.

Esta regra permite garantir a segurança no processo de tomada de decisão de espera no ar quando os interesses individuais entrarem em conflito a ponto de não existir interseção entre os conjuntos *satisficing* de cada entidade. Neste caso, prevalecerá o conjunto *satisficing* para decisões AHP do Serviço ATC.

4.6.2 Regras de Sequenciamento GDP

Uma decisão $u \in D$, tal que D é o conjunto de decisões GDP, possui um valor de utilidade praxiológica que pode ser calculado conforme a diferença entre o seu valor de seletibilidade GDP e rejeitabilidade GDP. Deste modo, a utilidade praxiológica de uma

decisão GDP é dada por $\mu_{gdp_E}(u) = p_S(u) - q_E \cdot p_R(u)$, onde $\mu_{gdp}(u)$ é a utilidade praxiológica da decisão GDP $u \in D$ para a entidade E , $p_S(u)$ é a seletibilidade da decisão $u \in D$, $p_R(u)$ é a rejeitabilidade da decisão $u \in D$ e q_E é o *índice de cautela* da entidade E , considerando que, para o caso da entidade Serviço ATC o *índice de cautela* será sempre 1, por razões de segurança.

O valor de utilidade praxiológica entre as decisões GDP permite obter uma sequência ordenada de decolagens segundo a utilidade da decisão $u \in D$ para cada entidade. Deste modo, voos com baixa utilidade quanto à permanência em solo para alguma entidade aparecem primeiramente nesta lista ordenada de decolagem, partindo da decisão de menor utilidade para a de maior utilidade, conforme preferências de uma entidade específica.

Para estabelecer regras de ordenação GDP para voos é dado um conjunto de voos $F_{gdp} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ sujeitos a decisões GDP, de tal modo que o conjunto pode ser ordenado segundo os valores de utilidade praxiológica das decisões GDP de uma entidade.

Definição 4.3 Regra de sequenciamento GDP segundo preferências do Aeroporto - O conjunto de voos F_{gdp} sujeitos a decisões GDP é ordenado a partir do menor valor de utilidade praxiológica de decisão GDP para o Aeroporto. Sejam os voos $f_k \in F_{gdp}$ e $f_m \in F_{gdp}$, se $\mu_{gdp_A}(u_k) \leq \mu_{gdp_A}(u_m)$, então $f_k \prec f_m$, onde u_k é a decisão GDP para o voo f_k e u_m é a decisão GDP para o voo f_m .

Formalmente, esta regra é definida conforme a Equação 4.6.3:

$$\langle F_{gdp} \rangle_A = \{(f_k, f_m | k \leq n \wedge m \leq n) \wedge (\mu_{gdp_A}(u_k) \leq \mu_{gdp_A}(u_m)) \rightarrow f_k \prec f_m\} \quad (4.6.3)$$

Definição 4.4 Regra de sequenciamento GDP segundo preferências da Empresa Aérea - O conjunto de voos F_{gdp} sujeitos a decisões GDP é ordenado a partir do menor valor de utilidade praxiológica de decisão GDP para a Empresa Aérea. Sejam os voos $f_k \in F_{gdp}$ e $f_m \in F_{gdp}$, se $\mu_{gdp_L}(u_k) \leq \mu_{gdp_L}(u_m)$, então $f_k \prec f_m$, onde u_k é a decisão GDP para o voo f_k e u_m é a decisão GDP para o voo f_m .

Formalmente, esta regra é definida conforme a Equação 4.6.4:

$$\langle F_{gdp} \rangle_L = \{(f_k, f_m | k \leq n \wedge m \leq n) \wedge (\mu_{gdp_L}(u_k) \leq \mu_{gdp_L}(u_m)) \rightarrow f_k \prec f_m\} \quad (4.6.4)$$

Definição 4.5 Regra de sequenciamento GDP segundo preferências do Serviço ATC - O conjunto de voos F_{gdp} sujeitos a decisões GDP é ordenado a partir do menor valor de utilidade praxiológica de decisão GDP para Serviço ATC. Sejam os voos

$f_k \in F_{gdp}$ e $f_m \in F_{gdp}$, se $\mu_{gdp_C}(u_k) \leq \mu_{gdp_C}(u_m)$, então $f_k \prec f_m$, onde u_k é a decisão GDP para o voo f_k e u_m é a decisão GDP para o voo f_m .

Formalmente, esta regra é definida conforme a Equação 4.6.5:

$$\langle F_{gdp} \rangle_C = \{(f_k, f_m | k \leq n \wedge m \leq n) \wedge (\mu_{gdp_C}(u_k) \leq \mu_{gdp_C}(u_m)) \rightarrow f_k \prec f_m\} \quad (4.6.5)$$

4.6.3 Regras de Sequenciamento AHP

Uma decisão $u \in H$, tal que H é o conjunto de decisões AHP, possui um valor de utilidade praxiológica de decisão AHP que pode ser calculado conforme a diferença entre o seu valor de seletibilidade AHP e rejeitabilidade AHP. Deste modo, a utilidade praxiológica de uma decisão AHP é dada por $\mu_{ahp_E}(u) = p_S(u) - q_E \cdot p_R(u)$, onde $\mu_{ahp}(u)$ é a utilidade AHP da decisão $u \in H$ para a entidade E , $p_S(u)$ é a seletibilidade da decisão $u \in H$, $p_R(u)$ é a rejeitabilidade da decisão $u \in H$ e q_E é o *índice de cautela* da entidade E , considerando que, para o caso da entidade Serviço ATC o *índice de cautela* será sempre 1, por razões de segurança.

O valor de utilidade praxiológica entre as decisões AHP permite obter uma sequência ordenada de pousos segundo a utilidade praxiológica da decisão $u \in H$ para cada entidade. Deste modo, voos com baixa utilidade quanto à permanência no ar para alguma entidade aparecem primeiramente nesta lista ordenada de pouso, partindo da decisão de menor utilidade para a de maior utilidade, conforme preferências de uma entidade específica.

Para estabelecer regras de ordenação AHP para voos, considera-se um conjunto de voos $F_{ahp} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ sujeitos a decisões AHP, de tal modo que o conjunto pode ser ordenado segundo os valores de rejeitabilidade de uma entidade.

Definição 4.6 *Regra de sequenciamento AHP segundo preferências da Empresa Aérea* - O conjunto de voos F_{ahp} sujeitos a decisões AHP é ordenado a partir do menor valor de utilidade praxiológica de decisão AHP para a Empresa Aérea. Seja $f_k \in F_{ahp}$ e $f_m \in F_{ahp}$, se $\mu_{ahp_L}(u_k) \leq \mu_{ahp_L}(u_m)$, então $f_k \prec f_m$, onde u_k é a decisão AHP para o voo f_k e u_m é a decisão AHP para o voo f_m .

Formalmente, esta regra é definida conforme a Equação 4.6.6:

$$\langle F_{ahp} \rangle_L = \{(f_k, f_m | k \leq n \wedge m \leq n) \wedge (\mu_{ahp_L}(u_k) \leq \mu_{ahp_L}(u_m)) \rightarrow f_k \prec f_m\} \quad (4.6.6)$$

Definição 4.7 Regra de sequenciamento AHP segundo preferências do Serviço ATC - O conjunto de voos F_{ahp} sujeitos a decisões AHP é ordenado a partir do menor valor de utilidade praxiológica de decisão AHP para Serviço ATC. Seja $f_k \in F_{ahp}$ e $f_m \in F_{ahp}$, se $\mu_{ahp_C}(u_k) \geq \mu_{ahp_C}(u_m)$, então $f_k \prec f_m$, onde u_k é a decisão AHP para o voo f_k e u_m é a decisão AHP para o voo f_m .

Formalmente, esta regra é definida conforme a Equação 4.6.7:

$$\langle F_{ahp} \rangle_C = \{(f_k, f_m | k \leq n \wedge m \leq n) \wedge (\mu_{ahp_C}(u_k) \geq \mu_{ahp_C}(u_m)) \rightarrow f_k \prec f_m\} \quad (4.6.7)$$

Em caso de decisões AHP, não há uma regra de ordenamento de voos segundo as preferências do aeroporto.

4.7 ETAPA 6 - IDENTIFICAR TODAS AS OPÇÕES DE DECISÃO

A tomada de decisão implica em conhecer quais são as opções de decisão disponíveis. Os tipos de decisão são AHP e GDP, porém é necessário saber quais aeronaves estão sujeitas a estas decisões. Este conhecimento ocorre a partir da solicitação de pouso ou decolagem de um voo f . Deste modo, dado um instante t na dentro de uma TMA x , todos voos que solicitaram autorização à torre de controle para operação de pouso ou decolagem, automaticamente se tornam voos sujeitos a decisão de espera no ar (AHP) ou espera em solo (GDP), respectivamente. Voos sujeitos a decisão GDP compõem o conjunto $D \subset U$, por outro lado, voos sujeitos a decisões AHP compõem o conjunto $H \subset U$. Com isto, a união entre os conjuntos $D \subset U$ e $H \subset U$ compõem o conjunto U de todas as opções de decisão.

4.8 ETAPA 7 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Esta etapa da metodologia teve como foco o projeto e desenvolvimento de um protótipo computacional. O protótipo desenvolvido permite: (i) Computar valores de rejeitabilidade de cada entidade para decisões GDP e AHP para todos os voos, com ou sem *índice de cautela* de cada entidade; (ii) Computar valores de seletibilidade de cada entidade para decisões GDP e AHP para todos os voos com ou sem *índice de cautela*; (iii) Computar valores de utilidade praxiológica de decisões para cada entidade para decisões GDP e AHP e para todos os voos com ou sem *índice de cautela* e (iv) Sequenciar voos pela utilidade praxiológica para decisões GDP ou AHP de cada entidade. Os detalhes de projeto e

desenvolvimento do protótipo computacional podem ser melhor visualizados no anexo B e os detalhes dos algoritmos utilizados no protótipo podem ser visualizados no anexo A.

4.9 ETAPA 8 - TOMADA DE DECISÃO

O procedimento de tomada de decisão que satisfaz as preferências das entidades participantes do ambiente CDM faz uso das políticas de prioridade de decisão. Primeiramente identifica-se o tipo de decisão (AHP ou GDP) para aplicar políticas e regras estabelecidas na Subseção 4.6. O procedimento finaliza com a decisão do Serviço ATC orientado pela sequência de pouso ou decolagem para decisões AHP e GDP, respectivamente.

4.9.1 Tomada de decisão GDP

O processo de tomada de decisão GDP envolve as três entidades participantes. O diagrama da Figura 4.3 apresenta as atividades a serem executados para obter o ordenamento satisfatório de decolagens para voos em espera em solo como suporte a tomada de decisões GDP.

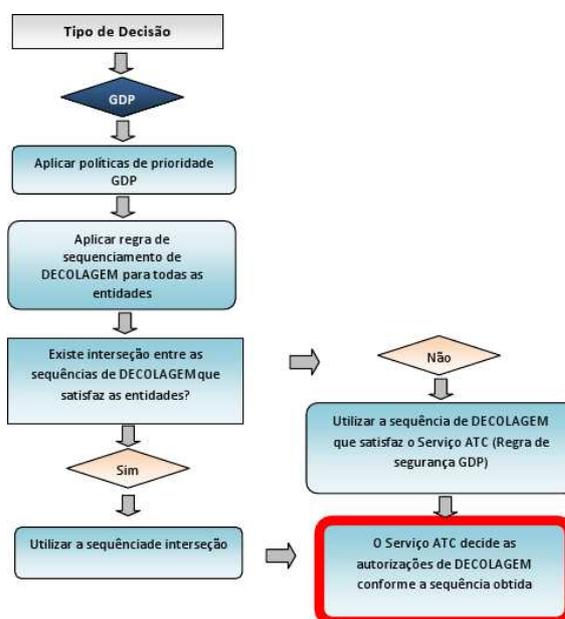


Figura 4.3 – Procedimento de tomada de decisão GDP

De acordo com a Figura 4.3, o processo de ordenamento *satisficing* de espera em solo se inicia com o levantamento do conjunto de possíveis decisões GDP. Este conjunto é submetido a políticas de prioridade que definem o conjunto *satisficing* GDP de cada entidade. Após este procedimento, aplica-se paralelamente as regras de sequenciamento das entidades a cada conjunto *satisficing* GDP obtidos no passo anterior. Em seguida, verifica-se

se o conjunto *satisficing* GDP é vazio e, neste caso, aplica-se a Regra de Segurança para decisões GDP e adota-se somente o conjunto *satisficing* do Serviço ATC. Caso o conjunto *satisficing* GDP não seja vazio, o processo obtém a ordem satisfatória de espera no solo conforme a interseção conjuntos *satisficing* de cada entidade. O procedimento termina com a tomada de decisão pelo Serviço ATC com base na sequência de decolagem obtida.

4.9.2 Tomada de decisão AHP

O procedimento de tomada de decisão AHP envolve as entidades Serviço ATC e Empresa Aérea. O diagrama da Figura 4.4 apresenta as atividades necessárias ao ordenamento satisfatório para aeronaves em procedimentos de espera em voo, como subsídio à tomada de decisão AHP.

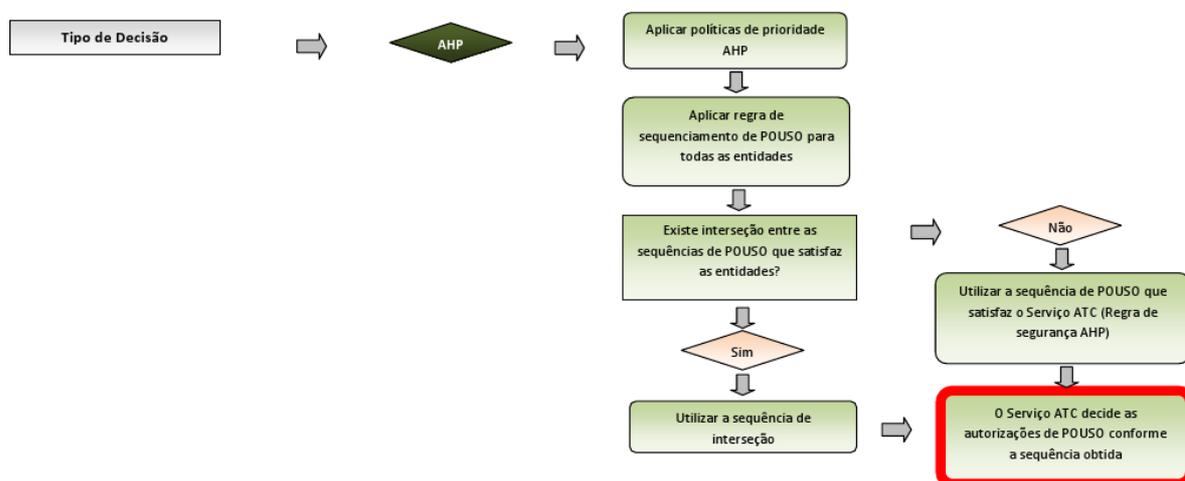


Figura 4.4 – Procedimento para tomada de decisão AHP.

O processo de ordenamento *satisficing* de espera no ar descrito no diagrama da Figura 4.4 é similar ao processo para decisões GDP e se inicia com o levantamento do conjunto de possíveis decisões AHP que é submetido a políticas de prioridade que definem o conjunto *satisficing* AHP de cada entidade. Após este procedimento, aplica-se paralelamente as regras de sequenciamento das entidades Empresa Aérea e Serviço ATC a cada conjunto *satisficing* obtidos no passo anterior. Em seguida, verifica-se se o conjunto *satisficing* AHP é vazio e, neste caso, aplica-se a Regra de Segurança para decisões AHP e adota-se somente o conjunto *satisficing* do Serviço ATC. Caso o conjunto *satisficing* AHP não seja vazio, o processo obtém a ordem satisfatória de espera no ar conforme a interseção dos conjuntos *satisficing* de cada entidade. O procedimento termina com a tomada de decisão pelo Serviço ATC com base na sequência de pouso obtida.

4.10 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Este capítulo apresentou a metodologia proposta para contribuição na gestão da tomada de decisão colaborativa pela entidade Serviço ATC, considerando os interesses das entidades Empresa Aérea e Gestor do Aeroporto. O capítulo buscou definir conceitos para orientar a aplicação da metodologia proposta direcionada para o Gerenciamento de Tráfego Aéreo. A metodologia para contribuição na gestão da tomada de decisão busca compatibilizar os conceitos da Teoria dos Jogos *Satisficing* para as entidades participantes do ambiente de decisão colaborativa, com vista a melhorar a fluidez segura do tráfego de aeronaves em uma porção do espaço aéreo controlado, denominada área terminal.

O objetivo do desenvolvimento da metodologia para gestão da tomada de decisão colaborativa pelo Serviço ATC em ambiente CDM foi contribuir para o preenchimento de uma lacuna com relação no processo de tomada de decisão em gerenciamento e fluxo de tráfego aéreo, considerando que o processo atual se dá pela experiência acumulada dos supervisores de tráfego aéreo, sem considerar as preferências do parceiro aeroporto neste processo. Com a metodologia proposta, a decisão a ser tomada pela entidade Serviço ATC encontra subsídio em termos de seu grau de utilidade praxiológica para cada entidade participante do CDM.

A estruturação da metodologia proposta, composta por oito etapas, tem como uma de suas etapas o mapeamento das funções de preferência das entidades que permite identificar as preocupações de cada entidade; o Serviço ATC, por exemplo, busca a segurança na fluidez do tráfego, as empresas aéreas buscam maximizar seus lucros e equidade na distribuição de atrasos; o aeroporto busca eficiência dos serviços e conforto para o passageiro. A metodologia também tem como etapas a elaboração do Modelo *Satisficing* e posteriormente a definição de políticas e regras que são incluídas no desenvolvimento de um protótipo computacional que realiza os cálculos para contribuir na gestão da tomada de decisão.

5 TOMADA DE DECISÃO EM AEROPORTOS DA TMA-SP

5.1 APRESENTAÇÃO

Considerando as etapas de 1 a 6 da metodologia para contribuir na tomada de decisão colaborativa, foi desenvolvido um protótipo computacional conforme detalhamento de projeto apresentado no anexo B. Assim, será descrita, com base nos resultados do protótipo, a tomada de decisão AHP e GDP para os aeroportos de Guarulhos e Congonhas, ambos situados na Área Terminal de São Paulo (TMA-SP).

Foram consideradas situações como alto e baixo fluxo de tráfego, tanto para decisões AHP como para GDP. Após estes resultados iniciais, também foram aplicados *índices de cautela* para as mesmas situações de alto e baixo fluxo com vista a obter novos resultados para serem posteriormente comparados com os resultados iniciais. A análise dos resultados mostrados neste capítulo será apresentada no capítulo 6.

Este capítulo está dividido da seguinte forma: Descrição dos cenários e dados, planejamento de estudo de caso, decisões GDP em cenário de alto fluxo, decisões AHP em cenários de alto fluxo, decisões GDP em cenários de baixo fluxo, decisões AHP em cenários de baixo fluxo e decisões AHP e GDP com alteração de *índice de cautela*.

5.2 DESCRIÇÃO DE CENÁRIOS E DADOS

Os dados empregados nos testes referem-se a fluxos de entrada e saída na Área Terminal de São Paulo (TMA-SP). Os fluxos de saída de área terminal referem-se a voos que decolam dos aeroportos de Guarulhos (SBGR) e Congonhas (SBSP), ambos situados na TMA-SP; são voos sujeitos a procedimentos de espera em solo (GDP). Os fluxos de entrada na área terminal referem-se a voos que têm como destino os aeroportos de Guarulhos e Congonhas. Os cenários de alto fluxo referem-se ao dia 11 de junho de 2009, feriado de *Corpus Christi*. Os cenários de baixo fluxo referem-se ao dia 11 de março de 2009. Os dados foram coletados na visita ao CGNA em 2009 pela equipe do Laboratório de Modelos Computacionais para Transporte Aéreo da Universidade de Brasília - TRANSLAB. Estes dados representam cenários reais de fluxo aéreo brasileiro. A Figura 5.1 apresenta a configuração da Área Terminal de São Paulo com a localização de seus aeroportos.

A seleção dos registros no grupo de dados para decisões AHP e GDP nos cenários de

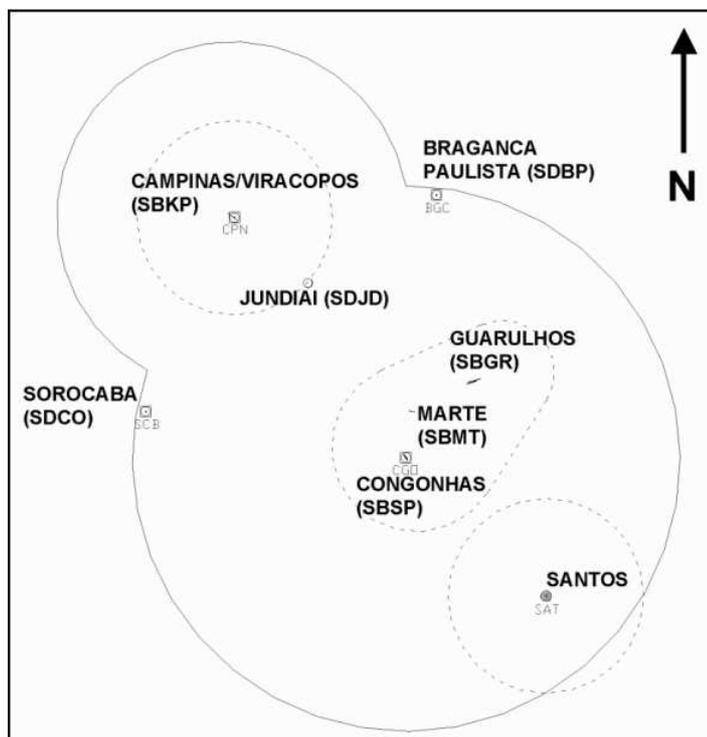


Figura 5.1 – TMA-SP e seus aeroportos. Fonte: (FRAGA, 2009)

alto e baixo fluxo foram conduzidas por meio de prospecção e filtragem para encontrar momentos nos dias selecionados onde ocorre disputa de recursos entre os dois aeroportos, isto é, onde existe demanda simultânea de pouso e decolagem. Os aeroportos de Guarulhos e Congonhas foram selecionados para os testes em razão de sua maior importância dentro da TMA-SP.

A informação acerca da quantidade de vagas dos estacionamentos de aeronaves foi obtida nas Cartas de Estacionamentos de Aeródromos para Guarulhos e Congonhas, conforme anexos C e D, respectivamente. As áreas dos terminais de passageiros de Guarulhos foram obtidas no endereço eletrônico institucional do [Aeroporto de Guarulhos](#) (BRASIL, 2014). A área do terminal de passageiros de Congonhas foi obtida no endereço eletrônico do [Complexo Aeroportuário de Congonhas](#) (INFRAERO, 2014), como parte do sítio eletrônico oficial da INFRAERO.

Os dados fornecidos não dispõem da quantidade de passageiros por voo, no entanto cada registro de movimento aéreo fornece o tipo da aeronave que permite inferir a quantidade de passageiros por voo. A informação do tipo de aeronave foi utilizada para realizar consultas aos fabricantes das aeronaves para determinar a quantidade de passageiros por voo com boa aproximação da realidade. De posse destas informações, foi possível estimar a quantidade de passageiros que ocupavam os terminais nos momentos de alto e baixo fluxo nos aeroportos de Guarulhos e Congonhas para voos em espera em solo.

5.3 PLANEJAMENTO DE ESTUDO DE CASO

O estudo envolve quatro cenários onde existem duas situações possíveis tanto para decisões GDP quanto para decisões AHP. O primeiro cenário refere-se a decisões GDP em situação de fluxo elevado de voos que aguardam decolagem; o segundo cenário apresenta decisões AHP com demanda elevada de aeronaves que desejam pousar, o terceiro apresenta decisões GDP em uma situação onde há pouca concorrência de voos que aguardam em solo a autorização para decolagem e o quarto cenário representa decisões AHP em uma situação de baixa demanda de aeronaves que aguardam o pouso. Os experimentos foram executados sob o sistema operacional Windows 7, 64 bits, em uma máquina Intel Core I5 - 2400 3.10GHZ com 8GB de memória RAM.

5.4 DECISÕES GDP EM CENÁRIO DE ALTO FLUXO

A metodologia proposta foi testada no cenário de fluxo elevado de movimentação aérea para decisões GDP. O teste teve início com a simulação de decisões de espera em solo por cinco minutos para todos os voos que aguardavam decolagem.

Tabela 5.1 – Aeronaves no solo de Guarulhos (SBGR)

Voo	d_{Ath}	$d_{Ath_{max}}$	$p_{R_C}(u)$	$p_{R_L}(u)$	$p_{R_A}(u)$	$p_S(u)$
GLO7452	5	30	0,005	0,345	0,000	0,500
TAM3848	0	30	0,005	0,547	0,000	0,500
GLO1664	15	30	0,005	0,690	0,000	0,500
GLO1902	15	30	0,005	0,690	0,000	0,500
GLO1610	24	30	0,005	1,000	0,000	0,500
GLO7600	21	30	0,005	0,897	0,000	0,500
PTB1488	18	30	0,005	0,793	0,000	0,500
TAM9364	15	30	0,005	0,690	0,000	0,500
VRN8698	27	30	0,005	1,000	0,000	0,500
GLO1644	14	30	0,005	0,655	0,000	0,500
GLO1872	17	30	0,005	0,759	0,000	0,500
GLO7488	21	30	0,005	0,897	0,000	0,500
WEB6761	15	30	0,005	0,690	0,000	0,500
ONE6174	28	30	0,005	1,000	0,000	0,500
TAM3301	23	30	0,005	0,966	0,000	0,500
TAM3157	14	30	0,005	0,655	0,000	0,500
GLO1774	16	30	0,005	0,724	0,000	0,500
TAM9566	9	30	0,005	0,483	0,000	0,500

Aplicando o protótipo desenvolvido com os dados de entrada do atraso acumulado em minutos d_{Ath} e o Tempo máximo em minutos que o voo pode atrasar no solo $d_{Ath_{max}}$, bem

como o conjunto com os registros de voo, a metodologia proposta retornou os resultados intermediários dispostos nas Tabelas 5.1 e 5.2 que refletem as rejeitabilidades e seletibilidade para a decisão simulada de espera em solo por cinco minutos. As sequências dos voos disposta nas Tabelas 5.1 e 5.2 são as sequências reais de decolagem que ocorreram em cada aeroporto no dia selecionado para testes. Cada linha das Tabelas 5.1 e 5.2 apresenta os seguintes dados:

Voo	Identificador do voo;
d_{Ath}	Atraso acumulado do voo em minutos - espera em solo;
$d_{Ath_{max}}$	Tempo máximo em minutos que o voo pode atrasar no solo;
$p_{RC}(u)$	Rejeitabilidade do Serviço ATC à decisão de espera em solo;
$p_{RL}(u)$	Rejeitabilidade da Empresa Aérea à decisão de espera em solo;
$p_{RA}(u)$	Rejeitabilidade do Aeroporto;
$p_S(u)$	Seletibilidade à decisão de espera em solo

Tabela 5.2 – Aeronaves no solo de Congonhas (SBSP)

Voo	d_{Ath}	$d_{Ath_{max}}$	$p_{RC}(u)$	$p_{RL}(u)$	$p_{RA}(u)$	$p_S(u)$
GLO1290	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500
TAM3920	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500
TAM3115	7	30	0,005	0,414	0,740	0,500
GLO1334	11	30	0,005	0,552	0,740	0,500
GLO1328	8	30	0,005	0,448	0,740	0,500
TAM3138	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500
GLO1520	9	30	0,005	0,483	0,740	0,500
TAM3214	10	30	0,005	0,517	0,740	0,500
GLO1322	10	30	0,005	0,517	0,740	0,500
GLO1386	6	30	0,005	0,379	0,740	0,500
TAM3922	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500
GLO1310	6	30	0,005	0,379	0,740	0,500
GLO1972	6	30	0,005	0,379	0,740	0,500
TAM3462	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500
GLO1522	6	30	0,005	0,379	0,740	0,500
GLO1854	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500
TAM3039	4	30	0,005	0,310	0,740	0,500
TAM3274	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500
GLO1220	0	30	0,005	0,547	0,740	0,500

Nas Tabelas 5.1 e 5.2, o valor $p_{RC}(u)$ foi obtido da Equação 4.4.2, o valor $p_{RL}(u)$ foi obtido pelo maior valor dentre as Equações 4.4.6 e 4.4.8 conforme determina o Algoritmo A.2 para decisões GDP; o valor $p_{RA}(u)$ foi obtido pela Equação 4.4.11 e o valor $p_S(u)$ foi obtido pela Equação 4.4.12. Convém destacar que, em decisões GDP, o valor da seletibilidade $p_S(u)$ se mantém fixo nas Tabelas 5.1 e 5.2, ou seja, para os dois aeroportos, devido a este valor se referir a uma única entidade, no caso, o Serviço ATC, pois a seletibilidade de uma decisão GDP se relaciona ao espaço aéreo disponível na Área Terminal de São

Tabela 5.3 – Ordem satisfatória de decolagem em alto fluxo

Sequencial	Voos
1	GLO1610, VRN8698, ONE6174
2	TAM3301
3	GLO7600, GLO7488
4	PTB1488
5	GLO1872
6	GLO1774
7	GLO1902, GLO1664, TAM9364, WEB6761
8	GLO1644, TAM3157
9	GLO1334
10	GLO1290, TAM3920, TAM3138, TAM3922, TAM3462, GLO1854, TAM3274, GLO1220
11	TAM3848
12	TAM3214, GLO1322
13	GLO1520
14	TAM9566
15	GLO1328
16	TAM3115
17	GLO1386, GLO1310, GLO1972, GLO1522
18	GLO7452
19	TAM3039

Paulo.

A título de resultado final, o modelo retornou um sequenciamento disposto na Tabela 5.3. A sequência representa uma ordem satisfatória de decolagens que atende as preferências das Empresas Aéreas, os Aeroporto de Guarulhos e Congonhas e o Serviço de ATC que gerencia a Área Terminal de São Paulo, conforme a utilidade praxiológica das decisões GDP para cada entidade. Cada linha da Tabela 5.3 possui um número sequencial que indica a ordem em que os voos devem ser autorizados a decolar e ao lado de cada sequencial é apresentado um voo ou uma lista de voos a serem autorizados a decolar. Estas listas de voos ao lado do sequencial não representam uma ordem específica para decolagem, apenas indicam que os voos listados possuem prioridades iguais de decolagem.

5.5 DECISÕES AHP EM CENÁRIO DE ALTO FLUXO

No cenário de fluxo elevado de movimentação aérea, o modelo também foi submetido a testes para decisões de espera no ar (AHP). O teste teve início com a simulação de decisões de espera no ar por cinco minutos para todos os voos que desejam pousar.

As sequências dos voos dispostas Tabelas 5.4 e 5.5 são as sequências reais de pouso que ocorreram em cada aeroporto no dia selecionado para os testes. Cada linha das Tabelas

5.4 e 5.5 apresenta os seguintes dados:

Voo	Identificador do voo;
d_{Ath}	Atraso acumulado do voo em minutos - espera no ar;
$p_{RC}(u)$	Rejeitabilidade do Serviço ATC à decisão de espera no ar;
$p_{RL}(u)$	Rejeitabilidade da Empresa Aérea à decisão de espera no ar;
$p_S(u)$	Seletibilidade à decisão de espera no ar

Tabela 5.4 – Aeronaves em espera no ar com destino a Guarulhos (SBGR)

Voo	d_{Ath}	$p_{RC}(u)$	$p_{RL}(u)$	$p_S(u)$
TAM8000	0	0,011	0	0,250
TAM3343	0	0,011	0	0,250
TAM3361	11	0,011	0,145	0,250
TAM8096	15	0,011	0,432	0,250
BSL2009	17	0,011	0,575	0,250
WEB6760	20	0,011	0,789	0,250
WEB6762	23	0,011	1	0,250
WEB6766	25	0,011	1	0,250
WEB6764	0	0,011	0	0,250
GLO1649	27	0,011	1	0,250
GLO1629	29	0,011	1	0,250
GLO7452	25	0,011	1	0,250
GLO7650	29	0,011	1	0,250
PTB1487	32	0,011	1	0,250
PTB1491	0	0,011	0	0,250
AMG6600	0	0,011	0	0,250
ONE6175	33	0,011	1	0,250
TAM9383	34	0,011	1	0,250
TAM9557	36	0,011	1	0,250
TAM9365	31	0,011	1	0,250
TAM9567	33	0,011	1	0,250
GLO1947	29	0,011	1	0,250
GLO1659	26	0,011	1	0,250
ONE6153	21	0,011	0,861	0,250

Aplicando o protótipo desenvolvido com os dados de entrada do atraso acumulado do voo em minutos d_{Ath} , bem como o conjunto com os registros de voo, a metodologia proposta retornou como resultado intermediário os valores de rejeitabilidade e seletibilidade para as entidades nos aeroportos Guarulhos e Congonhas. Estes resultados intermediários foram dispostos nas Tabelas 5.4 e 5.5. Os resultados intermediários apresentam valores de seletibilidade e rejeitabilidade específicos para as preferências do Serviço ATC e Empresas Aéreas. Em decisões de espera no ar, o modelo não estabelece rejeitabilidades para o aeroporto, por outro lado a seletibilidade está relacionada à preferência do aeroporto quanto à ocupação de pátio de estacionamento.

Tabela 5.5 – Aeronaves em espera no ar com destino a Congonhas (SBSP)

Voo	d_{Ath}	$p_{RC}(u)$	$p_{RL}(u)$	$p_S(u)$
TAM3211	0	0,011	0	0,5
TAM3227	0	0,011	0	0,5
TAM3209	0	0,011	0	0,5
TAM3213	0	0,011	0	0,5
TAM3215	0	0,011	0	0,5
TAM3219	0	0,011	0	0,5
TAM3203	11	0,011	0,145	0,5
TAM3223	0	0,011	0	0,5
TAM3225	15	0,011	0,432	0,5
TAM3217	16	0,011	0,503	0,5
PTN4709	15	0,011	0,432	0,5
PTN4749	15	0,011	0,432	0,5
PTN4763	20	0,011	0,789	0,5
GLO1281	15	0,011	0,432	0,5
GLO1295	17	0,011	0,575	0,5
GLO1283	19	0,011	0,718	0,5
GLO1285	15	0,011	0,432	0,5
GLO1839	20	0,011	0,789	0,5
GLO1311	25	0,011	1	0,5
GLO1313	16	0,011	0,503	0,5
GLO1297	19	0,011	0,718	0,5
ONE6173	16	0,011	0,503	0,5

Nas Tabelas 5.4 e 5.5, o valor $p_{RC}(u)$ foi obtido da Equação 4.4.4, o valor $p_{RL}(u)$ foi obtido pela Equação 4.4.6 conforme determina o Algoritmo A.2 para decisões AHP e o valor $p_S(u)$ foi obtido pela Equação 4.4.13.

Como resultado final, o modelo retornou um sequenciamento disposto na Tabela 5.6. Esta sequência propõe uma ordem satisfatória para pouso que atente aos interesses das Empresas Aéreas e do Serviço ATC que controla a TMA-SP, com base na utilidade praxiológica das decisões AHP para cada entidade. Os números sequenciais da primeira coluna da Tabela 5.6 indicam a ordem em que os voos (ou lista de voos) da segunda coluna devem ser autorizados a pousar. As listas de voos ao lado do sequencial não representam uma ordem específica para pouso, indicam apenas que os voos listados possuem prioridades iguais de pouso.

5.6 DECISÕES GDP EM CENÁRIO DE BAIXO FLUXO

Nos testes em cenário de fluxo reduzido de movimentos aéreos, quanto a decisões GDP, foi simulada uma decisão de espera em solo por cinco minutos para todos os voos

Tabela 5.6 – Ordem satisfatória de pouso em alto fluxo

Sequencial	Voos
1	WEB6762, WEB6766, GLO1649, GLO1629, GLO7452, GLO7650, PTB1487, ONE6175, TAM9383, TAM9557, TAM9365, TAM9567, GLO1947, GLO1659
2	ONE6153
3	WEB6760
4	GLO1311
5	BSL2009
6	PTN4763, GLO1839
7	GLO1283, GLO1297
8	TAM8096
9	GLO1295
10	TAM3217, GLO1313, ONE6173
11	TAM3225, PTN4709, PTN4749, GLO1281, GLO1285
12	TAM3361
13	TAM8000, TAM3343, WEB6764, PTB1491, AMG6600
14	TAM3203
15	TAM3211, TAM3227, TAM3209, TAM3213, TAM3215, TAM3219, TAM3223

que aguardavam em solo. O modelo retornou resultados intermediários quanto a valores de rejeitabilidade e seletibilidade para esta simulação de decisão GDP. Os resultados intermediários são mostrados nas Tabelas 5.7 e 5.8 para os aeroportos de Guarulhos e Congonhas, respectivamente. Convém ressaltar que a sequência de decolagens das Tabelas 5.7 e 5.8 são as sequências reais impostas pelo Serviço ATC no dia selecionado para teste em baixo fluxo. Vale lembrar que o valor da seletibilidade $p_S(u)$ em decisões GDP se mantém fixo nas Tabelas 5.7 e 5.8 devido ao fato de se referir a uma única entidade, no caso, o Serviço ATC, considerando que seletibilidade GDP se relaciona ao espaço aéreo disponível na Área Terminal de São Paulo.

Tabela 5.7 – Aeronaves no solo de Guarulhos (SBGR)

Voo	d_{Ath}	$d_{Ath,max}$	$p_{RC}(u)$	$p_{RL}(u)$	$p_{RA}(u)$	$p_S(u)$
WEB6740	10	30	0,005	1	0,000	0,500
GLO1708	0	30	0,005	0,172	0,000	0,500
GLO1658	2	30	0,005	0,241	0,000	0,500
TAM9364	0	30	0,005	0,172	0,000	0,500
GLO1668	3	30	0,005	0,352	0,000	0,500
GLO1845	2	30	0,005	0,241	0,000	0,500
TAM3174	0	30	0,005	0,172	0,000	0,500
GLO1941	8	30	0,005	1	0,000	0,500
GLO1648	0	30	0,005	0,172	0,000	0,500
GLO2340	0	30	0,005	0,172	0,000	0,500

Considerando as utilidades praxiológicas das decisões GDP para as entidades em cenário de baixo fluxo de tráfego, o modelo retornou como resultado final a sequência de

Tabela 5.8 – Aeronaves no solo de Congonhas (SBSP)

Voo	d_{Ath}	$d_{Ath,max}$	$p_{R_C}(u)$	$p_{R_L}(u)$	$p_{R_A}(u)$	$p_S(u)$
TAM3660	10	30	0,005	1	0,000	0,500
TAM3212	8	30	0,005	1	0,000	0,500
TAM3720	8	30	0,005	1	0,000	0,500
PTN4772	7	30	0,005	1	0,000	0,500
TAM3246	2	30	0,005	0,241	0,000	0,500
GLO1594	4	30	0,005	0,521	0,000	0,500
GLO1770	7	30	0,005	1	0,000	0,500

Tabela 5.9 – Ordem satisfatória de decolagem em baixo fluxo

Sequencial	Voos
1	WEB6740, GLO1941, TAM3660, TAM3212, TAM3720, PTN4772, GLO1770
2	GLO1594
3	GLO1668
4	GLO1658, GLO1845, TAM3246
5	TAM9364, TAM3174, GLO1648, GLO2340, GLO1708

decolagens apresentadas na Tabela 5.9. Esta sequência atende às preferências das três entidades participantes do CDM.

5.7 DECISÕES AHP EM CENÁRIO DE BAIXO FLUXO

As sequências das Tabelas 5.10 e 5.11 são as sequências reais de pouso que foram aplicadas pelo Serviço ATC no dia selecionado para teste em baixo fluxo.

Tabela 5.10 – Aeronaves em espera no ar com destino a Guarulhos(SBGR)

Voo	d_{Ath}	$p_{R_C}(u)$	$p_{R_L}(u)$	$p_S(u)$
TAM9667	0	0,024	0	0,071
TAM3457	0	0,024	0	0,071
TAM3467	0	0,024	0	0,071
ABZ6000	5	0,024	0	0,071
TAM3578	0	0,024	0	0,071
TAM3571	5	0,024	0	0,071
TSD9314	0	0,024	0	0,071
TAM3589	0	0,024	0	0,071
TAM3587	5	0,024	0	0,071
TAM3583	10	0,024	0,071	0,071
WEB6737	10	0,024	0,071	0,071
GLO1737	14	0,024	0,357	0,071
GLO1698	15	0,024	0,429	0,071
GLO1853	16	0,024	0,5	0,071
GLO1847	17	0,024	0,571	0,071

Tabela 5.11 – Aeronaves em espera no ar com destino a Congonhas (SBSP)

Voo	d_{Ath}	$p_{RC}(u)$	$p_{RL}(u)$	$p_S(u)$
TAM3463	19	0,024	0,714	0,111
TAM3471	0	0,024	0	0,111
TAM3461	16	0,024	0,500	0,111
TAM3469	0	0,024	0	0,111
GLO1771	18	0,024	0,643	0,111
GLO1773	19	0,024	0,714	0,111
GLO1353	20	0,024	0,786	0,111
GLO1355	21	0,024	0,857	0,111

Nos testes para o cenário de baixo fluxo para decisões de espera no ar, o modelo retornou resultados intermediários com valores de rejeitabilidade e seletibilidade para simulação de decisões de espera no ar por cinco minutos para todos os voos que aguardavam autorização para pouso. Estes resultados intermediários são apresentados nas Tabelas 5.10 e 5.11, nas quais os voos se destinam aos aeroportos de Guarulhos e Congonhas respectivamente.

Tabela 5.12 – Ordem satisfatória de pouso em baixo fluxo

Sequencial	Voos
1	GLO1355
2	GLO1353
3	TAM3463, GLO1773
4	GLO1771
5	GLO1847
6	GLO1853
7	TAM3461
8	GLO1698
9	GLO1737
10	TAM3583, WEB6737
11	TAM9667, TAM3457, TAM3467, ABZ6000, TAM3578, TAM3571, TSD9314, TAM3589, TAM3587
12	TAM3471, TAM3469

Considerando as utilidades praxiológicas das decisões AHP para as entidades em cenário de baixo fluxo de tráfego, o modelo retornou como resultado final a sequência de pousos apresentadas na Tabela 5.12. Esta sequência atende às preferências das entidades Empresas Aéreas e Serviço ATC. O modelo não estabelece rejeitabilidades AHP para a entidade Gestor do Aeroporto, no entanto as preferências desta entidade são consideradas na Equação 4.4.13 de seletibilidade para fluidez do tráfego.

5.8 DECISÕES AHP E GDP COM ALTERAÇÃO DE *ÍNDICE DE CAUTELA*

O Modelo *Satisficing* CDM provê ainda a aplicação de um *Índice de Cautela* para as entidades. As alterações neste índice permitem avaliar a sensibilidade da solução proposta, ao flexibilizar o grau de rejeição de uma entidade a uma determinada decisão. Assim, foi aplicado um *Índice de Cautela* $q_L = 0,8$ para os voos com rejeitabilidade maiores que 0,7 que é considerado um valor alto de rejeição tanto para decisões AHP, quanto para GDP. Este valor do *Índice de Cautela* foi escolhido por ser considerado razoável para os testes no ambiente ATFM, de modo que a entidade possa admitir um risco de 20%, o que permite reduzir o seu valor de rejeição a uma decisão, portanto a sua cautela situa-se em 80%.

5.8.1 Decisões GDP em alto fluxo com *Índice de Cautela*

A tabela 5.13 apresenta a ordem de decolagem com aplicação de *índice de cautela* para alto fluxo. Embora o modelo também preveja um *Índice de Cautela* para o aeroporto (q_A),

Tabela 5.13 – Ordem satisfatória de decolagem em alto fluxo com *Índice de Cautela* $q_L = 0,8$.

Sequencial	Voos
1	GLO1610, VRN8698, ONE6174
2	TAM3301
3	GLO7600, GLO7488
4	GLO1902, GLO1664, TAM9364, WEB6761
5	GLO1644, TAM3157
6	PTB1488
7	GLO1872
8	GLO1774
9	GLO1334
10	TAM3848, GLO1290, TAM3920, TAM3138, TAM3922, TAM3462, GLO1854, TAM3274, GLO1220
11	TAM3214, GLO1322, TAM9566, GLO1520
12	GLO1328
13	TAM3115
14	GLO1386, GLO1310, GLO1972, GLO1522
15	GLO7452
16	TAM3039

os resultados obtidos com a massa de dados disponível indicam que o aeroporto de Guarulhos possui rejeitabilidade zero e apenas o aeroporto de Congonhas possui rejeitabilidade significativa, portanto aplicar *Índice de Cautela* apenas para o aeroporto de Congonhas

não implica em alterações na ordem de decolagem das aeronaves. Por outro lado, no cenário de alto fluxo, as maiores variações de rejeitabilidade ocorrem para a entidade Empresa Aérea.

Esta alteração nos parâmetros de rejeição dos voos por meio do *Índice de Cautela* proporciona uma nova configuração de sequência de decolagem proposta pelo Modelo *Satisficing* CDM, conforme mostra a Tabela 5.13, em comparação com a Tabela 5.3.

5.8.2 Decisões AHP em alto fluxo com *Índice de Cautela*

Ainda no cenário de alto fluxo, com o objetivo de testar o modelo para decisões AHP, foi aplicado um *Índice de Cautela* $q_L = 0,8$ para os voos com rejeitabilidade maiores que 0,7. Esta alteração nos parâmetros de rejeição dos voos proporcionou alterações na sequência de decolagem proposta pelo Modelo *Satisficing* CDM, conforme mostra a Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Ordem satisfatória de pouso em alto fluxo com Índice de Cautela $q_L = 0,8$.

Sequencial	Voos
1	WEB6762, WEB6766, GLO1649, GLO1629, GLO7452, GLO7650, PTB1487, ONE6175, TAM9383, TAM9557, TAM9365, TAM9567, GLO1947, GLO1659
2	ONE6153
3	WEB6760
4	BSL2009
5	GLO1311
6	TAM8096
7	PTN4763, GLO1839
8	GLO1295
9	GLO1283, GLO1297
10	TAM3217, GLO1313, ONE6173
11	TAM3225, PTN4709, PTN4749, GLO1281, GLO1285
12	TAM3361
13	TAM8000, TAM3343, WEB6764, PTB1491, AMG6600
14	TAM3203
15	TAM3211, TAM3227, TAM3209, TAM3213, TAM3215, TAM3219, TAM3223

5.8.3 Decisões GDP em baixo fluxo com *Índice de Cautela*

Nos mesmos moldes dos testes realizados em alto fluxo para decisões GDP, foi aplicado *Índice de Cautela* $q_L = 0,8$ para voos com rejeitabilidade maior que 0,7; porém o modelo retornou a mesma sequência de decolagem proposta na Tabela 5.9.

5.8.4 Decisões AHP em baixo fluxo com *Índice de Cautela*

No cenário de baixo fluxo para decisões AHP, foi aplicado um *Índice de Cautela* $q_L = 0,8$ para os voos com rejeitabilidade maiores que 0,7. Esta alteração nos parâmetros de rejeição dos voos proporciona pequenas alterações na sequência de decolagem, em razão da baixa seletibilidade dos aeroportos para decisões de espera no ar que é induzida pelo fluxo reduzido de voos, conforme mostra a Tabela 5.15 em comparação com a Tabela 5.12.

Tabela 5.15 – Ordem de pouso satisfatória que atende aos participantes do CDM

Sequencial	Voos
1	GLO1355
2	GLO1771
3	GLO1353
4	GLO1847
5	TAM3463, GLO1773
6	GLO1853
7	TAM3461
8	GLO1698
9	GLO1737
10	TAM3583, WEB6737
11	TAM9667, TAM3457, TAM3467, ABZ6000, TAM3578, TAM3571, TSD9314, TAM3589, TAM3587
12	TAM3471, TAM3469

5.9 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Este capítulo apresentou os resultados obtidos com a metodologia proposta para tomada de decisão colaborativa empregada em situações reais de movimentos aéreos nos aeroportos de Guarulhos e Congonhas situados na Área Terminal de São Paulo (TMA-SP). Neste cenário, as entidades envolvidas foram os dois aeroportos, as empresas aéreas dos voos que desejam decolar ou pousar nestes aeroportos, e o Serviço ATC, que foi representado pelo controle de tráfego da TMA-SP.

As situações de casos reais estudados com a metodologia proposta envolveram cenários de alto e baixo fluxo de movimentos aéreos. Para cada um destes dois cenários, a metodologia retornou resultados para decisões GDP e AHP.

A metodologia permitiu retornar valores intermediários por meio de simulação de decisões de espera em solo (GDP) e espera no ar (AHP) por meio de simulação de decisões de espera em cinco minutos para os dois tipos de decisões. Os resultados intermediários refletiram os valores de rejeitabilidade para cada entidade participante do CDM, bem como a seletibilidade para a fluidez do tráfego aéreo.

A partir dos resultados intermediários, o emprego da metodologia proposta retornou os resultados finais a partir dos valores de utilidade praxiológica das decisões GDP e AHP para cada entidade participante. Os resultados finais apresentam sequências de decolagem para decisões GDP e sequências de pouso para decisões AHP.

Além destes resultados, a alteração do *índice de cautela* permitiu a modificação da utilidade praxiológica das decisões para as empresas aéreas. Esta alteração refletiu em novas sequências de pouso ou decolagem.

Os resultados obtidos neste capítulo servirão de subsídios para o capítulo 6 que trará a análise destes resultados.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 APRESENTAÇÃO

Este capítulo destina-se a analisar os resultados obtidos no capítulo 5. Os resultados permitem avaliar a metodologia para contribuir na gestão da tomada de decisão AHP e GDP. Primeiramente, será feita a análise dos resultados com e sem o *índice de cautela* com respeito aos ganhos obtidos, em seguida, será realizada a avaliação da metodologia proposta.

6.2 ANÁLISE DE RESULTADOS SEM *ÍNDICE DE CAUTELA*

O estudo de caso se deu para os cenários de alto e baixo fluxo para cada tipo de decisão (GDP e AHP). Neste estudo, o *índice de cautela* permaneceu fixado em 1. Deste modo, esta seção será constituída pela análise de cada caso em subseções distintas. As subseções 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3 e 6.2.4 apresentam, respectivamente, as análises sem *índice de cautela* de Decisões GDP em alto fluxo, Decisões AHP em alto fluxo, Decisões GDP em baixo fluxo e Decisões AHP em baixo fluxo.

6.2.1 Caso 1: Decisões GDP em alto fluxo

Com base nos resultados intermediários mostrado nas Tabelas 5.1 e 5.2 para decisões GDP, é possível observar que a decisão de esperar em solo por cinco minutos é totalmente rejeitável para os voos GLO1610, VRN8698 e ONE6174, que aguardam em solo no Aeroporto de Guarulhos (SBGR). O Modelo CDM *Satisficing* retornou o valor máximo de rejeitabilidade para as Empresas aéreas que gerenciam estes voos ($p_{RL}(u) = 1$).

Por outro lado, especificamente para a entidade Aeroporto de Guarulhos, esta espera não é rejeitável com base na rejeitabilidade para este aeroporto ($p_{RA}(u) = 0$), que foi calculada pelo modelo. Este valor zero de rejeitabilidade ocorre em razão da ocupação do terminal de passageiros não chegar a alcançar a área mínima por passageiro. No entanto, esperar por cinco minutos no Aeroporto de Congonhas é significativamente rejeitável para a Empresa Aérea que administra o voo GLO1334 ($p_{RL}(u) = 0,552$), além disto, existe a rejeição do Aeroporto de Congonhas ($p_{RA}(u) = 0,740$) em face da ocupação do terminal de passageiros que faz a área por passageiros se aproximar do mínimo recomendável pela

FAA.

A metodologia retorna valores baixos de rejeitabilidade GDP para o Serviço ATC. Isto se deve ao valor de severidade de congestionamento da TMA-SP que pouco se aproxima da severidade máxima. Com isto, manter os voos em solo em qualquer dos dois aeroportos estudados é pouco rejeitável para esta entidade.

A seletibilidade GDP diz respeito a alcançar o objetivo de manter o voo em solo devido à atual ocupação do espaço aéreo controlado da TMA-SP. As seletibilidade constante das Tabelas 5.1 e 5.2 se mantêm na taxa de 0,5 para decisões de aguardar em solo por cinco minutos em qualquer dos dois aeroportos. Isto indica que há um equilíbrio de 50% para manter os aviões em solo e 50% para autorizá-los a decolar. O valor da seletibilidade é único, porque diz respeito à fluidez do tráfego, que é um comportamento desejável para todo o sistema.

Internamente, a metodologia aplica as regras de ordenamento de decolagem para cada entidade, para posteriormente retornar como resultado final uma ordem satisfatória de decolagens que atende os participantes CDM. Esta ordem de decolagem é obtida pela interseção dos conjuntos ordenados, considerando a utilidade de cada decisão para as entidades individualmente. Com base neste cenário de alto fluxo, a metodologia recomenda a sequência de decolagens satisfatória para as três entidades disposta na Tabela 5.3.

O sequenciamento apresentado pela Tabela 5.3 como sugestão da metodologia proposta apresenta listas de aeronaves no mesmo nível de sequenciamento. Isto determina que qualquer escolha de decisão de decolagem dos voos da lista de mesmo sequencial possui igual valor satisfatório. Por outro lado, quanto menor o sequencial, tanto mais satisfatório para as entidades será a decisão de autorizar a decolagem do voo.

A sequência sugerida na Tabela 5.3 apresenta uma ordem de decolagem que satisfaz as três entidades. Esta ordem é diferente da ordem real de decolagem apresentada nas Tabelas 5.1 e 5.2. A ordem satisfatória permite que voos com grande atraso acumulado possam ser reposicionados para o início da sequência. Por exemplo, o voo VRN8698 saindo de Guarulhos com 27 minutos de atraso foi deslocado para o início da sequência de decolagens na sugestão da metodologia proposta. A ordem satisfatória de decolagem também permite que o voo GLO1220, último a decolar de Congonhas, seja reposicionado para o meio da sequência, em razão da elevada rejeitabilidade do aeroporto e isto contribui para descongestionar o Aeroporto de Congonhas.

6.2.2 Caso 2: Decisões AHP em alto fluxo

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os resultados intermediários para decisões AHP em cenário de alto fluxo. Conforme se observa nas Tabelas 5.4 e 5.5, a rejeitabilidade AHP do Serviço ATC se mantém fixa, pois cada decisão produz impactos iguais no aumento dos atrasos para todas as aeronaves na TMA-SP. A rejeitabilidade do aeroporto não é tratada pelo modelo para o caso de decisões de espera no ar. O valor baixo de rejeitabilidade do Serviço ATC ocorre em razão da decisão de espera no ar por cinco minutos representar pouco acréscimo no atraso geral na TMA-SP.

Por outro lado, quanto à seletibilidade, o modelo retorna valores distintos para cada aeroporto: A seletibilidade AHP para Congonhas é expressa por $p_S(u) = 0,5$; para Guarulhos a seletibilidade é de $p_S(u) = 0,250$, isto indica que é mais recomendável manter esperando no ar as aeronaves que se destinam a Congonhas já que a seletibilidade AHP é maior.

A aplicação de regras de ordenamento de pouso permite que a metodologia retorne como resultados final uma ordem satisfatória de pouso neste cenário de alto fluxo para decisões AHP. Esta ordem satisfatória foi obtida pela interseção dos conjuntos ordenados, considerando a utilidade de cada decisão AHP para as entidades de forma individual. Com isto, a metodologia recomenda a sequência satisfatória de pousos para entidades, conforme a Tabela 5.6

O sequenciamento disposto na Tabela 5.6 como sugestão da metodologia proposta mostra listas de aeronaves no mesmo nível de sequenciamento de pouso. Isto determina que as escolhas de decisão de pouso dos voos da lista de mesmo sequencial possui igual valor satisfatório. Quanto menor o valor do sequencial do voo, tanto mais satisfatório para as entidades será a decisão de autorizar o pouso da aeronave.

A sequência sugerida na Tabela 5.6 apresenta uma ordem de pouso que satisfaz as três entidades. Diferentemente da ordem real de decolagem apresentada nas Tabelas 5.4 e 5.5. Esta ordem satisfatória permite que voos com grande atraso acumulado possam ser reposicionados no início da sequência de pouso. Por exemplo, o voo GLO1311 chegando a Congonhas com 25 minutos de atraso acumulado foi deslocado para posições superiores na sequência de pouso pela sugestão do modelo. A ordem satisfatória de pouso também permitiu que o voo PTB1487 chegando a Guarulhos, último a pousar, fosse deslocado para posições iniciais da sequência de pouso, em razão da sua elevada rejeitabilidade, isto contribui para a eficiência da empresa aérea e maior equidade quanto à distribuição, entre as empresas aéreas, dos atrasos acumulados na TMA-SP.

6.2.3 Caso 3: Decisões GDP em baixo fluxo

Para decisões GDP em cenário de baixo fluxo, a metodologia proposta retornou os resultados intermediários apresentados nas Tabelas 5.7 e 5.8. Com base nas rejeitabilidades das entidades nas Tabelas 5.7 e 5.8, é possível observar que a decisão de esperar em solo por cinco minutos é muito rejeitável para os voos WEB6740, GLO1941, TAM3660, TAM3212, TAM3720, PTN4772 e GLO1770, pois a rejeição das empresas aéreas destes voos é máxima. A alta rejeitabilidade ocorre porque estes voos são os que mais sofrem com a distribuição desigual dos atrasos na TMA-SP, já que são os voos mais atrasados. Por outro lado, não há rejeitabilidade para os aeroportos, pois em razão do baixo fluxo de movimentos, a ocupação dos terminais de passageiros de cada aeroporto não chega a alcançar o escopo de área por passageiro recomendada pela FAA.

A aplicação da regra de sequenciamento de decolagem para decisões GDP considera a utilidade praxiológica das decisões GDP para cada entidade individualmente. Considerando que a seletibilidade se mantém fixada na taxa de 0,5 para qualquer decisão de aguardar em solo por cinco minutos, e que a utilidade praxiológica da decisão para cada entidade é calculada pela diferença entre seletibilidade e rejeitabilidade, a metodologia recomenda que os voos com as maiores rejeitabilidades decolem tão logo seja possível.

Com base neste cenário de baixo fluxo, a metodologia proposta retornou uma ordem satisfatória de decolagens que atende aos participantes do ambiente CDM pela a interseção dos conjuntos, conforme mostra a Tabela 5.9.

A sequência sugerida na Tabela 5.9 apresenta uma ordem de decolagem ligeiramente diferente da ordem real apresentada nas Tabelas 5.7 e 5.8. Esta ordem satisfatória posiciona voos com grande atraso acumulado no início da sequência, ao mesmo tempo que desloca todos os voos sem atraso para o fim da sequência de decolagem. Esta sequência contribui para melhorar a equidade entre as empresas aéreas na distribuição dos atrasos acumulados.

6.2.4 Caso 4: Decisões AHP em baixo fluxo

Quanto a decisões AHP em cenário de baixo fluxo de movimentos aéreos, os resultados intermediários obtidos com a metodologia proposta foram apresentados nas Tabelas 5.10 e 5.11.

Com base nas rejeitabilidades, é possível observar que a decisão de esperar em solo por cinco minutos é muito rejeitável para os voos GLO1355, GLO1353, TAM3463 e GLO1773,

devido aos seus valores de rejeitabilidade. O valor da rejeitabilidade para o Serviço ATC se mantém baixo devido ao fluxo reduzido de aeronaves na TMA-SP.

Quanto à seletibilidade, a metodologia proposta retorna valores distintos para cada aeroporto: A seletibilidade AHP para Congonhas é $p_S(u) = 0,111$; para Guarulhos a seletibilidade é de $p_S(u) = 0,071$. Isto indica que é mais recomendável manter no ar aeronaves que se destinam a Congonhas já que a seletibilidade AHP é maior, considerando que a quantidade de vagas disponíveis no pátio de Congonhas é menor que em Guarulhos.

A aplicação da regra de sequenciamento, que considera a utilidade das decisões AHP para cada entidade de forma individual, a metodologia recomenda uma sequência satisfatória de pouso para os participantes do ambiente CDM pela interseção dos conjuntos *satisficing*, conforme mostra a Tabela 5.12.

A sequência sugerida na Tabela 5.12 apresenta uma ordem de pouso distinta da ordem real de pouso apresentada nas Tabelas 5.10 e 5.11. Esta ordem satisfatória permite que voos com maiores atrasos acumulados possam ser reposicionados no início da sequência de pouso respeitando a seletibilidade a decisões AHP para cada aeroporto, de modo a melhorar o desempenho das empresas aéreas e também a segurança do fluxo de aeronaves conforme as preferências do Serviço ATC.

6.3 ANÁLISE DO ÍNDICE DE CAUTELA

Os resultados da alteração do parâmetro *índice de cautela*, conforme apresentada nas Tabelas 5.13, 5.14 e 5.15 da seção 5.8, determinaram novas sequências de pouso para decisões AHP em alto e baixo fluxo de movimentos aéreos e em alto fluxo para decisões GDP em alto fluxo, no entanto, para decisões GDP em baixo fluxo a metodologia não mostrou sensibilidade. A seguir, são apresentadas as análises para cada caso.

6.3.1 Caso 1: Decisões GDP em alto fluxo com *índice de cautela*

Os resultados intermediários obtidos nas Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam valores de rejeitabilidade e seletibilidade para as entidades para decisões de espera em solo no cenário de alto fluxo de tráfego. Nestes resultados, quanto a valores de rejeitabilidade para as Empresas Aéreas, foi aplicado um *índice de cautela* de 0,8; fazendo reduzir o valor das rejeitabilidades calculadas para as Empresas Aéreas em 20%. Este *índice de cautela* foi aplicado para todos os voos com rejeitabilidade igual ou maior que 0,7. As alterações nos valores de rejeitabilidade pelo *índice de cautela* permite aumentar o valor de utilidade pra-

xiológica das decisões, e com isto uma nova configuração de ordenamento de decolagem pode ser obtida.

A Tabela 5.13 apresenta a nova sequência de decolagem obtida com a aplicação do *índice de cautela*. Comparando esta sequência com a com a sequência da Tabela 5.3 é possível observar, por exemplo, que a ordem da lista de voos GLO1902, GLO1664, TAM9364, WEB6761 foi modificada e reposicionada mais acima na ordem de decolagem, isto significa que voos com alta rejeitabilidade a espera em solo, ao aceitaram algum risco pelo *índice de cautela* permitiram que outros voos pudessem subir na preferência para decolar antes.

A possibilidade de alteração do *índice de cautela* para decisões GDP permite que metodologia proposta possa oferecer diferentes sugestões de sequências de decolagens em alto fluxo, proporcionando mais opções na gestão da tomada de decisão pelo Serviço ATC.

6.3.2 Caso 2: Decisões AHP em alto fluxo com *índice de cautela*

Com relação a decisões de espera no ar em alto fluxo, os valores dos resultados intermediários de rejeitabilidade e seletibilidade para as entidades foram apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5. Sobre estes valores, foi aplicado um *índice de Cautela* de 0,8 em todos os voos com rejeitabilidade para Empresas aéreas igual ou maior que 0,7. Isto que fez alterar os valores de utilidade praxiológica das decisões AHP para estes voos e assim uma nova configuração de sequência de pousos foi obtida, conforme mostra a Tabela 5.14.

Comparando a Tabela 5.14 que traz nova sequência pelo *índice de cautela*, com a Tabela 5.6 que apresenta a sequência sem o *índice de cautela*, é possível observar que ocorreram algumas as alterações na sequência de pousos. A maioria dos voos na nova sequência proposta tem como destino o Aeroporto de Congonhas, cuja seletibilidade para decisões de espera no ar está em 0,5. Por outro lado, a maioria dos voos submetidos ao *índice de cautela* $q_L = 0,8$ tem como destino o aeroporto de Guarulhos, cuja seletibilidade está em 0,25. O *índice de cautela* aplicado aos voos com destino a Guarulhos permitiu que alguns voos com destino a Congonhas subissem na ordem de sequência de pouso. Isto proporcionou melhora na eficiência financeira destes voos em face da possibilidade de negociação que o *índice de cautela* permite entre as Empresas Aéreas.

A modificação do *índice de cautela* para decisões AHP habilita a metodologia proposta a oferecer sugestões diferenciadas de sequências de pouso em alto fluxo, isto permite mais flexibilidade na gestão da tomada de decisão pelo Serviço ATC.

6.3.3 Caso 3: Decisões GDP em baixo fluxo com *índice de cautela*

Para decisões GDP em baixo fluxo, foi adotado procedimento igual ao cenário de alto fluxo, com aplicação de *índice de cautela* de 0,8 em todos os voos com rejeitabilidade para Empresa Aérea igual ou maior que 0,7. No entanto, a metodologia proposta não mostrou sensibilidade, pois retornou a mesma sequência de decolagem apresentada na Tabela 5.6.

6.3.4 Caso 4: Decisões AHP em baixo fluxo com *índice de cautela*

Os resultados intermediários apresentados nas Tabelas 5.10 e 5.11 apresentam os valores de rejeitabilidade e seletibilidade em baixo fluxo para decisões de espera no ar. Os valores de rejeitabilidade iguais ou maiores que 0,7 para Empresas aéreas de todos os voos foram multiplicados pelo *índice de cautela* de 0,8. Este cálculo permitiu modificar a utilidade praxiológica das decisões AHP para estes voos, permitindo, deste modo, uma nova configuração de sequência de pousos, conforme apresentada na Tabela 5.15.

Conforme é possível observar na Tabela 5.15, ocorreram poucas alterações em comparação com a Tabela 5.12. Em baixo fluxo, a metodologia proposta se comportou de forma semelhante ao teste em alto fluxo, onde a maioria dos voos com nova sequência proposta tem como destino o Aeroporto de Congonhas cuja seletibilidade para decisões de espera no ar está em 0,111. Por outro lado, a maioria dos voos submetidos ao *índice de cautela* $q_L = 0,8$ têm como destino o aeroporto de Guarulhos, cuja seletibilidade está em 0,071. O *índice de cautela* aplicado aos voos com destino a Guarulhos permitiu que alguns voos com destino a Congonhas subissem na ordem de sequência de pouso. Isto refletiu em melhora na eficiência financeira destes voos, em razão de possibilidade de negociação entre Empresas aéreas.

6.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Este capítulo apresentou a análise dos resultados obtidos no capítulo 5, buscando explorar os casos estudados para tomada de decisão na Área Terminal de São Paulo, em seus dois principais aeroportos, Guarulhos e Congonhas.

A análise dos resultados para espera no ar em cenários de alto e baixo fluxo de movimentos aéreos, conforme mostrado nas das Tabelas 5.4, 5.5, 5.10 e 5.11 permite visualizar uma comparação entre os perfis dos dois aeroportos e demonstra que a seletibilidade AHP para o Aeroporto de Guarulhos é menor que o Aeroporto de Congonhas. Deste modo, a seletibilidade a decisões de esperar no ar para aeronaves com destino a Guarulhos é mais

baixa, porque existe maior quantidade de vagas no pátio para acomodar os voos que desejam a pousar neste aeroporto. Para o Aeroporto de Congonhas, o valor de seletibilidade para o objetivo de manter aeronaves em espera no ar é em geral mais alto, pois os voos que desejam pousar neste aeroporto contam com pouco espaço para estacionar.

A análise dos resultados indica que a solução é efetiva em alto e baixo fluxo de movimento tanto para decisões de espera em solo (GDP) quanto espera no ar (AHP), e propõe sequências de pouso e decolagem para um conjunto de voos.

Para espera no solo em alto fluxo, a análise dos resultados verificou sugestões de sequências de decolagens distintas das sequências originalmente impostas pelo Serviço ATC. A sequência de decolagens sugerida pelo modelo refletiu o grau de satisfação das entidades participantes do CDM, ao passo que a sequência real constante nos dados coletados no CGNA considerava apenas as preferências de uma única entidade, o Serviço ATC.

Quanto a decisões de espera no ar em alto fluxo, a análise dos resultados mostrou uma sequência de pouso diferente da sequência adotada pelo Serviço ATC que considerava apenas suas preferências individuais. A sequência sugerida pelo modelo engloba as preferências das entidades do CDM e o seu grau de satisfação.

Com relação a espera em solo em baixo fluxo, a metodologia proposta sugeriu uma sequência que, embora seja satisfatória para as três entidades, refletiu as preferências das empresas aéreas, considerando que as rejeitabilidades do Serviço ATC e aeroportos estavam muito baixas em razão do pouco movimento de tráfego.

Para espera no ar em baixo fluxo, a metodologia proposta sugeriu uma sequência distinta da sequência adotada pelo Serviço ATC. Embora em baixo fluxo, a metodologia mostrou que as utilidades praxiológicas, considerando rejeitabilidades para voos em atraso no ar e seletibilidades AHP dos aeroportos, permitiram uma sequência de pouso que aliou os interesses das entidades envolvidas.

A metodologia proposta ainda permitiu um viés de negociação entre as entidades pela aplicação do *índice de cautela* que apresentou mudanças significativas para decisões GDP e AHP em alto fluxo de movimentos. No entanto, para baixo fluxo o *índice de cautela* aplicado resultou em mudanças pouco significativas para decisões de espera no ar (AHP) e no caso de espera em solo, a sequência retornada foi a mesma proposta sem o *índice de cautela*.

As alterações nas sequências de pouso e decolagem, com ou sem *índice de cautela* indicam que a metodologia proposta permite sugestões de operações de pouso e decolagem

que satisfaçam aos critérios de rejeitabilidade e seletibilidade das entidades, contribuindo desta forma na melhoria da gestão na tomada de decisão pelo Serviço ATC.

7 CONCLUSÕES

7.1 APRESENTAÇÃO

Esta tese apresentou uma iniciativa de pesquisa para suprir uma lacuna em trabalhos de suporte à decisão em Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo, ao propor uma metodologia para contribuir na gestão da tomada de decisão colaborativa para o Serviço ATC.

A metodologia desenvolvida está fundamentada na Teoria dos Jogos *Satisficing*, portanto se baseou no grau de aceitação (*selectability*) e rejeição (*rejectability*) das entidades Aeroporto, Empresas Aéreas e Serviço ATC que estão envolvidas nas operações AHP e GDP afim de melhorar a fluidez e segurança do tráfego aéreo.

O desenvolvimento da metodologia declarado na seção 1.5 como objetivo geral exigiu cumprir os objetivos específicos, conforme a seguir descrito:

(i) Foram mapeadas e selecionadas as preferências das entidades Gestor do Aeroporto, Empresas Aéreas e Serviço ATC. O mapeamento permitiu selecionar funções de preferência que modelam matematicamente as preocupações de cada entidade.

(ii) Com base nas funções de preferências mapeadas e selecionadas, foram desenvolvidas as funções de rejeitabilidade e seletibilidade para cada parceiro dentro do ambiente CDM, para a construção de um modelo fundamentado na Teoria dos Jogos *Satisficing*.

(iii) A partir da modelagem *satisficing*, foi criado um *framework* com definição de regras de segurança e sequenciamento de voos, políticas de prioridade de decisão e procedimentos de tomada de decisão colaborativa para o mecanismo CDM.

(iv) De posse do Modelo *Satisficing*, das regras, políticas e procedimentos de tomada de decisão foi possível projetar e desenvolver um protótipo computacional que implementou o mecanismo CDM envolvendo o parceiro Aeroporto na tomada de decisão colaborativa com as Empresas Aéreas e o Serviço ATC. O protótipo foi construído segundo o paradigma da Orientação a Objetos com acesso a banco de dados que armazenam os registros de movimentos aéreos para os cálculos de rejeitabilidade, seletibilidade e sequenciamento de voos.

(v) Os testes para validar a metodologia proposta foram conduzido por meio de estudos de caso que utilizaram registros reais de movimentos aéreos na Área Terminal de São Paulo

(TMA-SP) para decisões GDP e AHP em cenários de alto e baixo fluxo de movimentos aéreos.

Considera-se, portanto, que o objetivo geral e os objetivos específicos desta tese de doutorado foram atingidos conforme estabelecido na seção 1.5.

7.2 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA

A avaliação da metodologia desenvolvida nesta tese de doutorado envolve considerar aspectos positivos e aspectos a aprimorar.

7.2.1 Aspectos positivos

Como aspectos positivos, é possível destacar que a metodologia desenvolvida, por considerar as preferências de cada entidade, permite avaliar numericamente o grau de aceitação e rejeição de uma única decisão GDP ou AHP para cada entidade individualmente, conforme os fundamentos da Teoria dos Jogos *Satisficing*.

Esta análise de seletibilidade e rejeitabilidade das decisões para cada entidade habilita a entidade Serviço ATC a optar por decisões colaborativas conforme o valor de utilidade praxiológica de cada decisão para as entidades, com isto, as decisões com maiores valores de utilidade podem ser adotadas conforme as regras de sequenciamento e segurança.

A interdependência das decisões no Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo pode, com o emprego da metodologia, ser melhor visualizada pelo cálculo de rejeitabilidades e seletibilidades, de modo que identificam o grau de impacto que cada decisão tem em entidades distintas.

A metodologia mostrou-se efetiva no aprimoramento da gestão da tomada de decisão em ambiente CDM, ao fornecer sequenciamentos de pouso ou decolagens que atendem as preferências de cada entidade. A análise dos resultados apresentam sequências de pouso e decolagens diferentes daquelas originalmente praticadas pelo Serviço ATC, pois estas últimas foram adotadas sem os conceitos da Teoria dos Jogos *Satisficing*.

7.2.2 Aspectos a aprimorar

A metodologia proposta ainda carece de aprimoramentos, principalmente quanto ao mapeamento de preferências das entidades, pois dependendo do contexto onde se aplique a metodologia, outras preferências podem ser requeridas ou até mesmo suprimidas desta

metodologia proposta. Deste modo, novas funções de preferência precisam ser mapeadas e selecionadas, e isto se reflete nas funções de seletibilidade e rejeitabilidade que, por certo, serão alteradas. No cenário brasileiro, a variabilidade de contextos possivelmente possui pouco impacto quanto às funções de preferências que possam ser mapeadas e selecionadas, no entanto para outros contextos, a metodologia poderá ser adaptada conforme as preferências das entidades.

A metodologia proposta considera as preferências do Serviço ATC para a Área Terminal (TMA), no entanto a TMA é apenas uma instância do espaço aéreo controlado. A metodologia ainda não propõe procedimentos ou regras para fluidez do tráfego aéreo para os setores de controle adjacentes à TMA, que possuem impacto no fluxo dentro da própria área terminal.

As funções para o cálculo de severidade do congestionamento empregam exponenciais que, ao serem utilizadas para calcular a severidade máxima de um setor de controle, permitem o cálculo para setores com capacidade máxima de até vinte aeronaves, a partir desta quantidade de aeronaves, a severidade máxima começa a reduzir sua representatividade para computar valores de rejeitabilidade para o Serviço ATC em decisões de espera em solo. Esta função poderá ser substituída, ou mesmo alterada, com vista a melhorar a representatividade do cálculo para setores e áreas terminais com mais aeronaves.

A função para o cálculo da ocupação do terminal de passageiro empregou a área total do terminal para o cálculo da ocupação, conforme recomenda a FAA, no entanto, esta medida recomendada pela FAA é considerada uma medida de eficiência muito geral, pois esta área total engloba serviços distintos, controle de passaporte de embarque e desembarque, inspeção de segurança em Raio X, salão de embarque entre outros. Deste modo, para uma melhor representatividade, poderia ser utilizada na mesma função somente a área do saguão de embarque para o cálculo de rejeitabilidade do Aeroporto em decisões GDP. Um outro aspecto, diz respeito à rejeição a decisões AHP de voos que transportam passageiros com conexões. A metodologia proposta ainda não capta esta rejeitabilidade quanto aos impactos na ocupação do terminal de passageiros.

7.3 COMPARAÇÃO COM OUTRAS METODOLOGIAS

A metodologia proposta utiliza funções de rejeitabilidade e seletibilidade para propor sugestões de sequências de pousos e decolagens. No entanto, outros modelos em desenvolvimento na Universidade de Brasília também propõem sequenciamentos de decolagens, mas não de pousos. Por exemplo, o trabalho de [Ribeiro \(2013\)](#) sobre sequenciamento de

partidas em aeroportos com teoria dos jogos propõe um sequenciamento de aeronaves por meio de negociação de *slots* e para tal, utiliza algoritmos *Ratio by Schedule* e *Compression* e modela um jogo cooperativo entre as aeronaves que negociam os *slots*. O trabalho de [Ribeiro \(2013\)](#) apresentou uma metodologia muito eficiente para negociação entre instâncias de uma única entidade, As Empresas aéreas. O trabalho considera somente as preferências desta entidade, com isto, os impactos que a negociação entre voos pode exercer em outras entidades, como gestor do aeroporto e Serviço ATC, não são abordados pelo modelo de [Ribeiro \(2013\)](#). Por outro lado, a metodologia proposta nesta tese considera preferências das três entidades na sugestão de sequenciamento de decolagens e pousos para as decisões a serem tomadas.

Um outro exemplo, diz respeito ao trabalho de [Arruda Jr., Weigang e Nogueira \(2014\)](#) sobre decisões colaborativas em aeroportos que emprega o paradigma *Collaborative Decision Making*, também com emprego da Teoria dos Jogos e Tecnologia de *Matching*. O sistema propõe um método também eficiente para sequenciamento de decolagens para aeronaves em espera em solo, portanto concentra-se em decisões GDP para propor uma decisão colaborativa entre as empresas aéreas. A modelagem estabelece um mercado de *slots* onde o Serviço ATC tem papel central. Embora as entidades ATC, empresas aéreas e aeroportos tenham sido modelados no trabalho, os impactos das decisões individuais não estão presentes no modelo de [Arruda Jr., Weigang e Nogueira \(2014\)](#), de modo que não se estabelece o quão selecionável ou rejeitável é uma decisão para cada uma das entidades. Comparavelmente, a metodologia para contribuir na gestão da tomada de decisão colaborativa utiliza a Teoria dos Jogos *Satisficing* para estabelecer critérios intrínsecos de uma decisão. Estes critérios determinam, para uma mesma decisão, dois valores que exprimem o grau de rejeição e seleção à decisão com base nas preferências de cada entidade. Este critério de rejeitabilidade e seletibilidade das decisões permite estabelecer o impacto causado em cada entidade, por meio do valor de utilidade praxiológica da decisão para a entidade.

A metodologia proposta nesta tese permite estabelecer rejeitabilidade e seletibilidade das decisões, mas para isto, necessita de mapeamentos de preferências que outros modelos possam oferecer, portanto o modelo proposto visa trabalhar alinhado com outras soluções para otimização de entidades do cenário aéreo.

7.4 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho de tese de doutorado buscou contribuir com uma metodologia para avaliar a utilidade de decisões de espera no ar e espera em solo de modo a melhorar

a gestão da tomada de decisão colaborativa em aeroportos. O aprimoramento desta metodologia poderá contribuir na eventual criação de ferramentas que permitam o suporte à decisão colaborativa para as autoridades do setor aéreo, de modo a envolver as três entidades abordadas neste trabalho ou ainda outras entidades interessadas que porventura não tenham sido aqui mapeadas.

A metodologia mostrou-se confiável, tendo em vista que as variáveis apresentadas durante a aplicação dos testes corrobora com a abordagem teórica de [Stirling \(2003\)](#), onde os resultados apresentados consideram preferências individuais e preferências de grupo para as entidades consideradas.

Apesar do domínio de aplicação estar direcionado para o Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo, a solução poderá ser adaptada para outros domínios com o mesmo tipo de dinâmica onde se exija a colaboração entre entidades participantes para alcançar um ganho global do sistema.

Vale destacar, que as soluções direcionadas para o gerenciamento de tráfego aéreo no Brasil possuem uma tendência de otimizar isoladamente cada entidade envolvida no cenário aéreo, no entanto, dada a existência de múltiplas entidades afetadas pelas decisões unilaterais, os modelos de otimização que isolam cada entidade possivelmente representam de forma pouco realística a dinâmica e complexidade deste ambiente de interdependência de decisões.

Na perspectiva de preencher este espaço de pesquisa, a metodologia proposta nesta tese de doutorado buscou representar esta interdependência de decisões, ao identificar as entidades Gestor de Aeroporto, Empresas Aéreas e Serviço ATC como jogadores que consideram o seu desempenho individual, mas também, o desempenho global do sistema.

No âmbito acadêmico, o trabalho relacionado a esta tese de doutoramento obteve êxito em alguns congressos nacionais e internacionais, tais como:

- *Satisficing Collaborative Decision Making and Controlling for Airport Management*, The 10th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA 2014), Itália em Setembro de 2014 ([ALMEIDA; WEIGANG; MEINERZ, 2014](#)).
- *Modelagem de Funções Satisficing para Suporte a Tomada de Decisão Colaborativa nos Aeroportos*, XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (XXVIII ANPET), Curitiba-PR, Brasil 24 a 28 de novembro de 2014 (trabalho aceito) ([ALMEIDA; WEIGANG, 2014b](#)).

- *Jogos Satisficing para Tomada de Decisão Colaborativa em Aeroporto*, XIII Simpósio de Pesquisa em Transporte Aéreo (SITRAER XIII), São Paulo, 2014 (trabalho aceito) (ALMEIDA; WEIGANG, 2014a).
- *Abordagens em Teoria dos Jogos Satisficing para Balanceamento Fluxo Aéreo*, XI Simpósio de Pesquisa em Transporte Aéreo (SITRAER XI), Brasília, 2012 (ALMEIDA; WEIGANG, 2012).

7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O escopo deste trabalho envolveu uma metodologia para aprimorar a gestão da tomada de decisão colaborativa no ambiente de fluxo do tráfego aéreo. Para validar a metodologia desenvolvida foi necessário obter dados, porém as dificuldades na obtenção destes dados mostraram-se relevantes. Com isto, a seleção dos dados se deu por conveniência e foi necessário lançar mão de uma base com registros de movimentos aéreos de 2009 disponíveis no TRANSLAB para servir de massa de testes.

O volume de dados à disposição contribuiu para que o modelo fosse avaliado no cenário da Área Terminal de São Paulo (TMA-SP). No Brasil, ainda não existe CDM efetivamente implementado nos aeroportos, deste modo ainda não há dados que se possa comparar com as sugestões que a metodologia proposta oferece.

Em termos de trabalhos futuros, consta ainda a seguinte agenda de tarefas:

(i) Mapeamento e seleção de equações que modelem novas de preferências das entidades identificadas neste trabalho e também eventuais novos parceiros que possam fazer parte do processo de tomada de decisões colaborativas;

(ii) Mapear e selecionar novas funções para cálculo da severidade, ou mesmo, aprimorar a função atual para cálculo desta severidade de congestionamento de modo a dar mais representatividade da severidade do congestionamento;

(iii) Reavaliação da metodologia por meio de novos testes e estudos de caso com mais dados reais que possam corroborar ou refutar resultados com vista a calibrar a metodologia proposta;

(iv) Aplicação de novos cenários que envolvam não apenas áreas terminais mas também setores de controle do entorno destas áreas terminais.

(v) Adaptação da metodologia para contextos distintos do contexto brasileiro, com maiores movimentos de fluxo de tráfego, condições de tempo, infraestrutura aeronáutica

e aeroportuária para verificar e identificar novas preferências e entidades;

(vi) Comparação com outros modelos com mesmo grupo de dados para avaliar resultados sincronizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. **Análise de Múltiplos Algoritmos Aplicados em Balanceamento de Fluxo em Rede**. Dissertação ((MSc) Dissertação) — Universidade de Brasília, UnB, Nov 2010. Disponível em: <http://monografias.cic.unb.br/dspace/bitstream/123456789-/270/1/DISSERTACAO_CICEROALMEIDA_versao_final.pdf>. Acesso em: 12/05/2012.

ALMEIDA, C.; WEIGANG, L. Abordagens em teoria dos jogos satisficing para balanceamento fluxo aéreo. In: EPUSP (Ed.). **Simpósio de Pesquisa em Transporte Aéreo - Tecnologia Avançada de Transporte Aéreo no Brasil, Anais de XI SITRAER**. Brasília, 2012. p. 139–146.

ALMEIDA, C.; WEIGANG, L. Jogos satisficing para tomada de decisão colaborativa em aeroporto. In: EPUSP (Ed.). **Simpósio de Pesquisa em Transporte Aéreo - Tecnologia Avançada de Transporte Aéreo no Brasil, Anais de XIII SITRAER**. São Paulo, 2014.

ALMEIDA, C.; WEIGANG, L. Modelagem de funções satisficing para suporte a tomada de decisão colaborativa nos aeroportos. In: **XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes XXVIII ANPET**. Curitiba - PR, Brasil: [s.n.], 2014.

ALMEIDA, C.; WEIGANG, L.; MEINERZ, G. V. Satisficing collaborative decision making and controlling for airport management. In: **The 10th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems - MESA2014**. [S.l.: s.n.], 2014.

ANAC, A. Portal da anac - tipos de aeródromos. 2012. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/infraestrutura/infraestruturala.asp>>. Acesso em: 17/08/2012.

ANDERSON, R. M.; MAY, R. M. Population biology of infectious diseases: Part I. **Nature**, v. 280, n. 5721, p. 361–367, ago. 1979. ISSN 0028-0836. Disponível em: <<http://view.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/460412>>. Acesso em: 05/02/2012.

ANDREWS, J. W. The shortfall in airport capacity and opportunities for mitigation. **Transportation Analysis**, Springer-Verlag Berlim - Heidelberg, v. 1, n. 1, p. 75–94, 1999.

ARCHIBALD, J. K.; HILL, J. C.; JEPSEN, N. A.; STIRLING, W. C.; FROST, R. L. A satisficing approach to aircraft conflict resolution. **Trans. Sys. Man Cyber Part C**, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 38, n. 4, p. 510–521, jul. 2008. ISSN 1094-6977.

ARCHIBALD, J. K.; HILL, J. C.; JOHNSON, F. R.; STIRLING, W. C. Satisficing negotiations. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C**, v. 36, n. 1, p. 4–18, 2006.

Arruda Jr., A. C. de; WEIGANG, L.; NOGUEIRA, K. B. Enhancement of airport collaborative decision making through applying agent system with matching theory. In: **8th Int. Workshop on Agents in Traffic and Transportation - ATT@AAMAS**. Paris: [s.n.], 2014.

AXELROD, R. M. **The evolution of cooperation**. New York: Basic Books, 1984.

BANDEIRA, M. C. G. da S. P.; CORREIA, A. R. Avaliação da qualidade dos serviços do terminal de passageiros do aeroporto internacional de são paulo/guarulhos. In: SBTA - SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA EM TRANSPORTE AÉREO. **Simpósio de Pesquisa em Transporte Aéreo - VII SITRAER**. Rio de Janeiro, 2008. p. 457–468.

BASTOS, A.; BAUM, D. **Módulo 15 - Tráfego Aéreo**. maio 2007. Disponível em: <http://www.abp.esp.br/userfiles/files/Trafego_Aereo.pdf>. Acesso em: 10/03/2010.

BERTSIMAS, D.; GUPTA, S. Fairness in air traffic flow management. **INFORMS Annual Meeting**, 2009.

BORNHOLDT, S.; SCHUSTER, H. G. (Ed.). **Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 3527403361.

BRASIL. Aeroporto de guarulhos. site institucional do aeroporto de guarulhos. Agosto 2014. Disponível em: <<http://www.gru.com.br/pt-br/Institucional>>. Acesso em: 01/08/2014.

BRASIL, C. **ICA 100-12 - Tráfego Aéreo - Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo**. [S.l.], 2009.

BRASIL, C. **ICA 100-22 - Serviço de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo**. [S.l.], 2010.

BRASIL, C. Gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, uso flexível do espaço aéreo e decisão colaborativa - sirius 2013 - seminário atm. outubro 2013. Disponível em: <http://www.decea.gov.br/eventos/seminarioatm/wp-content/uploads/2013/10/CGNA_17-10.pdf>. Acesso em: 07/11/2013.

BRASIL, C. Serviço de informações aeronáuticas. Agosto 2014. Disponível em: <<http://www.aisweb.aer.mil.br>>. Acesso em: 01/08/2014.

CALDERÓN-MEZA, G.; SHERRY., L.; CONSIGLIO, M. Multi-agent simulation of nas infrastructure utilization in the presence of airline policies. In: **Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2009. ICNS '09.** [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–7.

COURNOT, A. A. **Researches into the Mathematical Principles of the Theory of Wealth.** [S.l.]: New York, A. M. Kelley, 1897.

CRESPO, A.; AQUINO, C. V.; SOUZA, B. B.; WEIGANG, L.; MELO, A. C. M. A.; CELESTINO, V. R. R. Distributed decision support system applied to tactical air traffic flow management in the case of cindacta i. **Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society**, v. 4, p. 47–60, 2008. ISSN 1808-3331.

CRUCIOL, L. L.; JR., A. C. de A.; WEIGANG, L.; LI, L.; CRESPO, A. M. Reward functions for learning to control in air traffic flow management. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 35, n. 0, p. 141 – 155, 2013. ISSN 0968-090X.

FERBER, J. **Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence.** [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 1999. ISBN 0201360489.

FERREIRA, P. Tracing complexity theory. In: **ESD.83 - Research Seminar in Engineering Systems.** [s.n.], 2001. Disponível em: <<http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/ESD83-Complexity.doc>>. Acesso em: 06/11/2013.

FRAGA, R. **Analysis of Criteria for Closely-Spaced Parallel Runway Approaches Applied to a Multiple Airport System.** Dissertação (Mestrado) — Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.

GAMMA, E.; HELM, R.; JOHNSON, R.; VLISSIDES, J. **Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software.** 2. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 1994.

GELL-MANN, M. **The quark and the jaguar: adventures in the simple and the complex.** New York: W. H. Freeman, 1994. ISBN 0716725819.

HARTWELL, L. H.; HOPFIELD, J. J.; LEIBLER, S.; MURRAY, A. W. From molecular to modular cell biology. **Nature**, v. 402, n. 6761 Suppl, p. C47–C52, 1999.

HOLLAND, J. H. **Hidden order: how adaptation builds complexity.** Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. ISBN 0201407930.

INFRAERO. Estatuto social - infraero: Aprovado pela assembleia geral extraordinária, realizada em 05 de julho de 2012. 2012. Dispo-

nível em: <http://www.infraero.gov.br/images/stories/Infraero/Estatuto/2012_ESTATUTO_DA_INFRAERO_AGE_05-06-2012.pdf>. Acesso em: 16/08/2012.

INFRAERO. Complexo aeroportuário de Congonhas. Agosto 2014. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/aeroportos/sao-paulo/aeroporto-de-sao-paulo-congonhas/complexo-aeroportuario.html>>. Acesso em: 01/08/2014.

INFRAERO. Estatística de movimentos operacionais nos aeroportos brasileiros. 2014. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatistica-dos-aeroportos.html>>. Acesso em: 05/02/2014.

JACOBSEN, R. Nasa's free flight air traffic management research. In: NASA FREE FLIGHT/DAGATM WORKSHOP. 2000. Disponível em: <<http://as.nasa.gov/aatt/wspdfs/Jacobsen\Overview.pdf>>. Acesso em: 10/03/2010.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation with Arena**. New York: McGraw-Hill, 2004.

KHADILKAR, H.; BALAKRISHNAN, H. Optimal control of airport operations with gate capacity constraints. In: **Control Conference (ECC), 2013 European**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 608–613.

LIMA, M.; CAMPONOGARA, E. Urban traffic network control by distributed satisficing agents. In: **Seventh International Workshop on Agents in Traffic and Transportation Proceedings, 2012. Eleventh International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2012)**. [S.l.: s.n.], 2012.

LIMLAWAN, V.; KASEMSONTITUM, B.; JEENANUNTA, C. Airline crew rostering problem using particle swarm optimization. In: **IEEE International Conference on Quality and Reliability**. [S.l.: s.n.], 2011.

LIU, C.; GUO, K. Airport taxi scheduling optimization based on genetic algorithm. **International Conference on Computational Intelligence and Security - IEEE Computer Society**, p. pp. 205–208, 2010.

LUCE, R. D.; RAIFFA, H. **Games and Decisions: Introduction and Critical Survey**. New York: [s.n.], 1957.

LUKE, S.; cioffi-Revilla, C.; PANAIT, L.; SULLIVAN, K. Mason: A new multi-agent simulation toolkit. In: . [S.l.: s.n.], 2004. v. 8.

- MA, Z.; CUI, D.; CHENG, P. Dynamic network flow model for short-term air traffic flow management. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans**, p. 34(3):351–358, 2004.
- MANDELBROT, B. B.; HUDSON, R. L. **The (Mis)behaviour of Markets**. [S.l.]: Profile Books Ltd, 2005.
- MARTIN, P.; HUDGELL, A.; BOUGE, N.; VIAL, S. Improved information sharing: A step toward the realization of collaborative decision making. In: _____. [S.l.: s.n.], 2001. v. 193, cap. 11, p. 161–175.
- MAYNARD SMITH, J. The theory of games and the evolution of animal conflicts. **Journal of Theoretical Biology**, v. 47, n. 1, p. 209–221, set. 1974. ISSN 00225193.
- MENG, G.; QI, F. Flight conflict resolution for civil aviation based on ant colony optimization. In: **Computational Intelligence and Design (ISCID), 2012 Fifth International Symposium on**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 1, p. 239–241.
- MYERSON, R. B. **Game Theory: Analysis of Conflict**. [S.l.: s.n.], 1991. p. 1. Chapter-preview links, pp. vii-xi. p.
- NASH, J. F. Equilibrium points in n-person games. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, p. 48–49, 1950.
- NASH, J. F. **Non-Cooperative Games**. Tese (Doutorado) — Princeton University, 1950.
- NEUMANN, J. V.; MORGENSTERN, O. **The Theory of Games and Economics Behavior**. [S.l.]: Princeton University Press, 1944.
- NOKLEBY, M. S.; STIRLING, W. C. Attitude adaptation in satisficing games. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B**, v. 39, n. 6, p. 1556–1567, 2009.
- NORIN, A. **Airport Logistics : Modeling and Optimizing the Turn-Around Process**. [S.l.]: Linköping University Electronic Press, 2008. 87 p. (Linköping Studies in Science and Technology. Thesis, 1388).
- ORDESHOOK, P. C. **Game Theory and Political Theory: An Introduction**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1986.
- QUANSHENG, L.; PENG, Z.; DONGQING, J.; TINGWEI, M. Research on the disrupted airline scheduling. In: **Service Systems and Service Management (ICSSSM), 2013 10th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 332–336.

- RIBEIRO, V. F. **Decisão colaborativa com utilização de Teoria dos Jogos para o sequenciamento de partidas em aeroportos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2013.
- RIBEIRO, V. F.; WEIGANG, L. Collaborative decision making with game theory for slot allocation and departure sequencing in airports. In: **17th Air Transport Research Society (ATRS) World Conference, 2013, Bergamo**. [S.l.: s.n.], 2013.
- ROLIM, H. L.; PORTELA, A. de A.; ALVES, R. de A. **O controle do espaço aéreo**. [S.l.], 2004.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 2nd edition. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2003.
- SIMON, H. A. Theories of decision-making in economics and behavioral science. **The American Economic Review**, v. 49, p. 253–283, jun. 1959.
- SKYRMS, B. The stag hunt. **Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association**, v. 75, n. 2, p. 31–41, 2001.
- SOTOMAYOR, M.; BUGARIN, M. S. **Lições de Teoria dos Jogos**. São Paulo: [s.n.], 2007.
- SOUZA, B. B. **Modelo de Balanceamento com Multi-Fluxos Para Aplicação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo**. Dissertação ((MSc) Dissertation) — Universidade de Brasília, UnB, 2008.
- SOUZA, B. B.; WEIGANG, L.; CRESPO, A. M. F.; CELESTINO, V. R. R. Flow balancing model for air traffic flow management. In: **SEKE**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 417–421.
- SOUZA, B. B. de; WEIGANG, L.; CRESPO, A. M. F.; CELESTINO., V. R. R. Balance modelling and implementation of flow balance for application in air traffic management. **IGI Global**, p. 38–56, 2009. Computational Models, Software Engineering, and Advanced Technologies in Air Transportation: Next Generation Applications.
- STACEY, R. **Complexity and creativity in organizations**. [S.l.]: Berrett-Koehler Publishers, 1996.
- STIRLING, W.; FROST, R. Reconciling group and individual preferences of multi-agent systems. In: **Networking, Sensing and Control, 2007 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 477–482.
- STIRLING, W. C. **Satisficing Games and Decision Making**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.

TOMLIN, C.; IMITCHELL; GHOSH, R. Safety verification of conflict resolution manoeuvres. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on**, v. 2, p. 110–120, 2001.

TONELLI, P. A. Jogos cooperativos. março 2006. Disponível em: <<http://www.ime.usp.br/~tonelli/mae515/jogoscooperativos.pdf>>. Acesso em: 21/08/2014.

XIAOHUI, J.; XUEJUN, Z.; XIANGMIN, G. A collision avoidance method based on satisficing game theory. **2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics**, 2012.

YOO, J.; DEVASIA, S. Provably safe conflict resolution with bounded turn rate for air traffic control. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 6, p. 2280–2289, Nov 2013. ISSN 1063-6536.

ZHANG, Z.; GAO, W.; WANG, L. Short-term flow management based on dynamic flow programming network. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 640–647., 2005.

ANEXOS

ANEXO A - ALGORITMOS

A.1 APRESENTAÇÃO

Este anexo visa apresentar os algoritmos da metodologia para contribuição na gestão da tomada de decisão implementados em protótipo computacional.

A.1.1 Algoritmo de rejeitabilidade

Na definição de rejeitabilidade de uma opção $u \in U$, são adotadas três políticas que privilegiam decisões para cada entidade, que são políticas de prioridade de decisões para Aeroporto, Empresa Aérea e Serviço ATC. Com base nestas políticas, é possível obter a rejeitabilidade de uma decisão para cada entidade, conforme o Algoritmo A.1.

Algoritmo A.1: $\text{Rejectability}(\rho, u \in U)$

```
1  $p_R(u) \leftarrow 0$ ;  
2 if  $\rho = \rho_A$  then  
3   |  $p_R(u) \leftarrow \text{RejectA}(u \in U)$ ;  
4 else if  $\rho = \rho_L$  then  
5   |  $p_R(u) \leftarrow \text{RejectL}(u \in U)$ ;  
6 else if  $\rho = \rho_C$  then  
7   |  $p_R(u) \leftarrow \text{RejectC}(u \in U)$ ;  
8
```

Os módulos *RejectA*, *RejectL* e *RejectC* retornam a rejeição de uma decisão $u \in U$ para o Aeroporto, Empresa Aérea e Serviço ATC, respectivamente, conforme a política ρ . Estes módulos empregam as equações de rejeitabilidade das entidades vistas na Seção 4.4. Os algoritmos destes módulos são descritos a seguir:

O Algoritmo A.2 detalha o módulo *RejectL*, que retorna a rejeitabilidade da entidade gestora da linha aérea. Para decisões AHP, o módulo *RejectL* considera a rejeitabilidade quanto à distribuição de atrasos para decisões AHP. Por outro lado, para decisões GDP, o módulo *RejectL* retorna o maior valor de rejeição entre distribuição de atrasos e impacto

financeiro.

Algoritmo A.2: $\text{RejectL}(u \in U)$

```
1  $p_{RL}(u) \leftarrow 0$ ;  
2 if  $u = \text{"ahp"}$  then  
3   |  $p_{RL}(u) \leftarrow p_{RD_L}(u)$ ;  
4 else if  $u = \text{"gdp"}$  then  
5   |  $p_{RL}(u) \leftarrow \max(p_{RD_L}(u), p_{RF_L}(u))$ ;
```

O Algoritmo A.3 detalha o módulo *RejectC*, que retorna a rejeitabilidade do Serviço ATC. Em decisões AHP, o módulo *RejectC* retorna a rejeitabilidade quanto ao aumento da variação do tempo de espera no ar. Para decisões GDP, a rejeitabilidade reflete o congestionamento induzido pela decisão de esperar em solo.

Algoritmo A.3: $\text{RejectC}(u \in U)$

```
1  $p_{R_c}(u) \leftarrow 0$ ;  
2 if  $u = \text{"ahp"}$  then  
3   |  $p_{R_c}(u) \leftarrow p_{RD_C}(u)$ ;  
4 else if  $u = \text{"gdp"}$  then  
5   |  $p_{R_c}(u) \leftarrow p_{RC_C}(u)$ ;
```

O Algoritmo A.4 detalha o módulo *RejectA*, que retorna a rejeitabilidade do aeroporto no aspecto de ocupação do terminal de passageiros. Neste sentido, o módulo *RejectA* retorna a ocupação do TPS que possui passageiros com embarque atrasado em razão de decisão GDP.

Algoritmo A.4: $\text{RejectA}(u \in U)$

```
1 if  $u = \text{"gdp"}$  then  
2   | return  $p_{RA}(u)$ ;  
3 else  
4   | return 0;
```

A.1.2 Algoritmo de seletibilidade

Quanto à seletibilidade, o Algoritmo A.5 retorna um valor específico para decisões GDP ou AHP.

Algoritmo A.5: Selectability($u \in U$)

```
1  $p_S(u) \leftarrow 0$ ;  
2 if  $u = \text{"gdp"}$  then  
3   |  $p_S(u) \leftarrow \text{SelectGDP}(u \in U)$ ;  
4 else if  $u = \text{"ahp"}$  then  
5   |  $p_S(u) \leftarrow \text{SelectAHP}(u \in U)$ ;
```

Os módulos *SelectGDP* e *SelectAHP* retornam o índice de seletibilidade de uma decisão $u \in U$ para espera em solo e espera no ar, respectivamente. Estes módulos calculam a seletibilidade com base nas equações de seletibilidade para pouso e decolagem vistas na Seção 4.4.

A.1.3 Algoritmo *Satisficing*

Dados a política de prioridade e o conjunto U de decisões possíveis, o conjunto de decisões *satisficing* S pode ser obtido pelo Algoritmo A.6.

Algoritmo A.6: Satisficing(ρ, U)

```
1  $S \leftarrow \emptyset$ ;  
2 For each  $u \in U$  do  
3   |  $p_R(u) \leftarrow \text{Rejectability}(\rho, u \in U)$ ;  
4   |  $p_S(u) \leftarrow \text{Selectability}(u \in U)$ ;  
5   | if  $p_S(u) \geq q_E \cdot p_R(u)$  then  
6   |   | add  $u$  to  $S$ ;  
7 return  $S$ ;
```

Convém lembrar que a variável q_E é o *índice de cautela* adotado pela entidade E .

ANEXO B - PROJETO DO PROTÓTIPO COMPUTACIONAL

B.1 APRESENTAÇÃO

Este anexo visa apresentar o projeto do protótipo computacional desenvolvido para simulação e testes. O protótipo computacional foi desenvolvido segundo o paradigma da orientação a objetos com a criação de classes específicas para persistência de dados, entidades e demais classes auxiliares, com emprego de padrões de projeto (*Design Patterns*).

B.1.1 Arquitetura do protótipo *SatisficingCDM*

A arquitetura do protótipo desenvolvido, segue o modelo de arquitetura MVC (*Model View Controller*) (GAMMA *et al.*, 1994), onde a solução é separada em camadas de Modelo, Visão e Controle. O modelo MVC emprega camadas que resolvem um problema específico. A camada de visão, trata apenas da entrada e saída dos dados. A camada de modelo trabalha na solução do problema a ser resolvido, que no caso do protótipo *SatisficingCDM*, consiste em fornecer suporte à decisão, por meio de listas de sequenciamento de pouso ou decolagem. A camada de controle fica entre a visão e o modelo, e interpreta as ações efetuadas na camada de visão com as chamadas específicas às funcionalidades da camada de modelo.

B.1.2 Padrão de nomenclatura de classes e atributos

No intuito de caracterizar melhor as classes de acordo com suas funcionalidades e camadas às quais pertencem, a nomenclatura das classes segue um padrão básico com os seguintes prefixos:

- *TO* - *Transfer Object* (Objeto de transferência);
- *BO* - *Business Object* (Objeto de negócios);
- *DAO* - *Data Access Object* (Objeto de acesso a dados);

As classes do tipo *TO* implementam os *beans* do sistema. Algumas classes *TO* fazem também o mapeamento objeto relacional. As classes *TO* servem para fazer a transferência

dos dados dentro da aplicação para que sejam trabalhados por outras classes. As classes *TO* estão no nível da camada de modelo.

As classes do tipo *BO* codificam a lógica da solução que o protótipo *SatisficingCDM* se propõe a resolver. As *BO* fazem parte da camada de negócios.

As classes *DAO* trabalham no acesso a dados para alimentar as *TO*, que, por sua vez, distribuem os dados dentro da aplicação. As classes *DAO* compõem a camada de persistência.

Todas as classes e atributos foram nomeados com termos da língua inglesa.

B.2 SUBMÓDULOS

O protótipo *SatisficingCDM* é composto por submódulos funcionais que tratam da persistência de dados, da análise de impacto das medidas GDP e AHP e do suporte à decisão. Os submódulos são descritos a seguir:

B.2.1 Submódulo *EntitiesPreferenceSM*

Módulo destinado a computar parâmetros de distribuição de atrasos, ocupação do TPS e severidade de congestionamentos com base nas equações de preferências de cada entidade.

B.2.2 Submódulo *SatisficingSM*

O módulo *SatisficingSM* realiza os cálculos dos valores de rejeitabilidade e seletibilidade de cada entidade para uma decisão em minutos de espera no ar (AHP) ou espera em solo (GDP). O módulo utiliza em seus códigos os algoritmos do Anexo A para computar os valores de rejeitabilidade e seletibilidade de cada entidade.

B.2.3 Submódulo *DecisionSupportSM*

O módulo *DecisionSupportSM* emprega os procedimentos descritos na Seção 4.9 para estabelecer a sugestão de sequência de decolagens, em caso de decisões de espera em solo, ou sugestão de sequência de pousos, em caso de decisões de espera no ar.

B.2.4 Submódulo *DataPersistenceSM*

Módulo auxiliar que faz acesso aos dados armazenados para resgate das informações das entidades e atribuição dos parâmetros do cenário, bem como armazena as sugestões do protótipo.

B.3 INTERAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS

O diagrama mostrado na Figura B.1 destaca a interação entre os módulos. O submódulo *EntitiesPreferenceSM* utiliza as informações obtidas pelo submódulo *DataPersistenceSM* para computar os parâmetros dos cenários dentro da TMA. O submódulo *SatisficingSM* faz a análise dos parâmetros dos cenários estabelecidos pelo submódulo *EntitiesPreferenceSM* e para isso emprega algoritmos que calculam os valores de rejeitabilidade e seletibilidade para uma dada decisão GDP ou AHP. O submódulo *DecisionSupportSM* interage com o submódulo *SatisficingSM* para estabelecer a sugestão de sequência de pouso ou decolagem, para decisões AHP e GDP, respectivamente e posteriormente envia os resultados para o módulo *DataPersistenceSM* para o armazenamento.

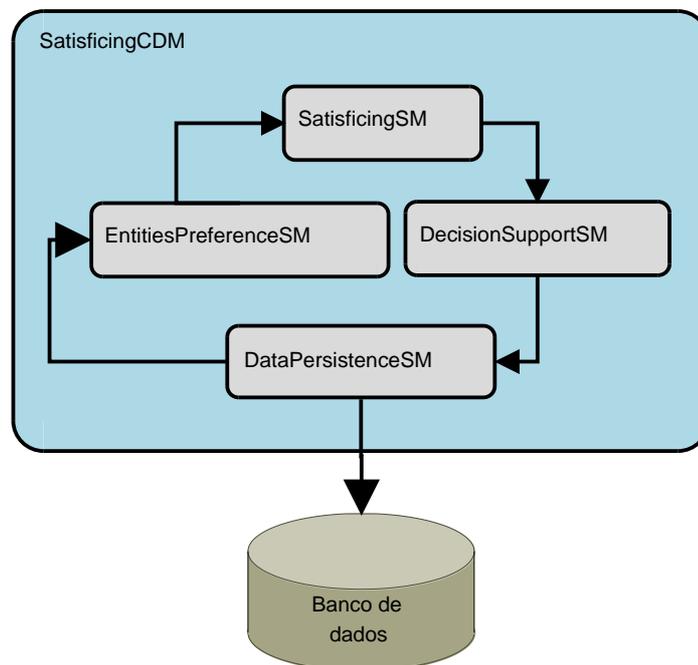


Figura B.1 – Arquitetura do Protótipo *SatisficingCDM*

B.4 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

Esta seção traz alguns detalhes de implementação do Protótipo *SatisficingCDM*. Esta seção não esgota todos os aspectos da implementação, mas aborda detalhes considerados

relevantes para o entendimento do funcionamento no protótipo.

A modelagem do protótipo segue uma estrutura de pacotes, onde foram reunidas classes que implementam características e funcionalidades específicas. Esta organização dos pacotes é a seguinte:

- ***satisficingCDM***: Pacote principal que contém todos os outros pacotes;
- ***start***: Pacote com a classe que inicia a execução do protótipo;
- ***process***: Pacote que concentra os pacotes *satisficingSM*, *entitiesPreferencesSM* e *supportDecisionSM*;
- ***controller***: Pacote que engloba as classes da camada de controle;
- ***beans***: Pacote que concentra as classes de modelo, em geral classes do tipo *TO - Transfer Object*;
- ***db***: Pacote que concentra as classes de conexão a banco de dados;

A Figura B.2 apresenta a estrutura hierárquica de pacotes do protótipo desenvolvido.

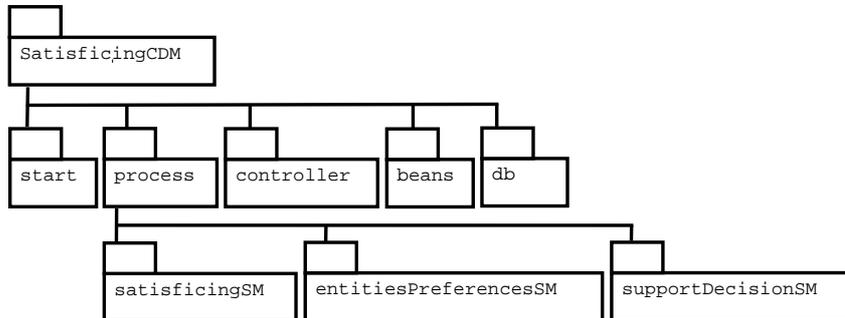


Figura B.2 – Estrutura de pacotes do Protótipo *SatisficingCDM*

O protótipo foi implementado em linguagem Java 7.0 na codificação das classes que compõem o protótipo. Os dados constam armazenados no sistema gerenciador de banco de dados relacional MySQL 5.0.

A classe *BO_EntitiesPreferences* é responsável por calcular os parâmetros do cenário com base nas preferências das entidades. Estes parâmetros consistem na distribuição de atrasos, total de aeronaves atrasadas, ocupação do terminal de passageiros, vagas disponíveis nos pátios dos aeroportos e quantidade de aeronaves em voo e em solo na TMA. Para isto, a classe recupera os dados das classes *TO_Flight*, *TO_Airport* e *TO_TMA* que foram preenchidos com informações em banco de dados. Os algoritmos de rejeitabilidade e seletibilidade foram implementados na classe *BO_SatisficingFunctions*. Na classe *BO_SupportDecision*, foi implementado o procedimento de tomada de decisão

satisficing que retorna a sugestão de sequenciamento de pousos e decolagens. A Figura B.3 apresenta o diagrama de classes mais importantes do Protótipo *SatisficingCDM*.

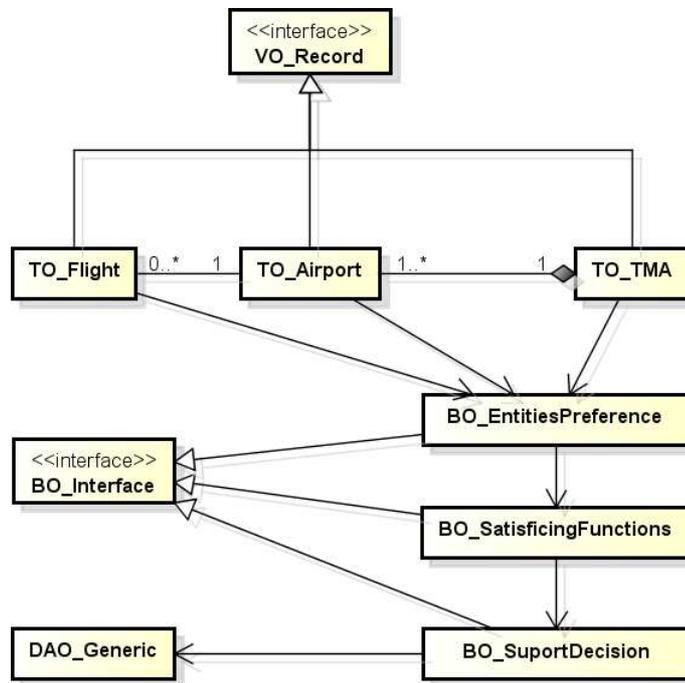


Figura B.3 – Diagrama de Classes do Protótipo *SatisficingCDM*

O protótipo possui como entradas a data dos movimentos de tráfego a serem analisados, o intervalo para análise dos movimentos, o tipo de decisão, a área terminal e os *índices de cautela* para cada entidade. A Figura B.4 apresenta a tela de entrada inicial do protótipo.



Figura B.4 – Tela inicial do protótipo *SatisficingCDM*.

O protótipo possui duas telas básicas de saídas. A Figura B.5 apresenta a tela do protótipo que retorna todas as rejeitabilidades e seletibilidades calculadas pela classe *BO_*-

----- Rejectability & Selectability: Guarulhos Airport (SBGR) -----

Voo	dAth	dAthmax	prc(u)	prl(u)	pra(u)	ps(u)
GLO7452	5	30	0.005	0.345	0.000	0.500
TAM3848	0	30	0.005	0.547	0.000	0.500
GLO1664	15	30	0.005	0.690	0.000	0.500
GLO1902	15	30	0.005	0.690	0.000	0.500
GLO1610	24	30	0.005	1.000	0.000	0.500
GLO7600	21	30	0.005	0.897	0.000	0.500
PTB1488	18	30	0.005	0.793	0.000	0.500
TAM9364	15	30	0.005	0.690	0.000	0.500
VRN8698	27	30	0.005	1.000	0.000	0.500
GLO1644	14	30	0.005	0.655	0.000	0.500
GLO1872	17	30	0.005	0.759	0.000	0.500
GLO7488	21	30	0.005	0.897	0.000	0.500
WEB6761	15	30	0.005	0.690	0.000	0.500
ONE6174	28	30	0.005	1.000	0.000	0.500
TAM3301	23	30	0.005	0.966	0.000	0.500
TAM3157	14	30	0.005	0.655	0.000	0.500
GLO1774	16	30	0.005	0.724	0.000	0.500
TAM9566	9	30	0.005	0.483	0.000	0.500

----- Rejectability & Selectability: Congonhas Airport (SBSP) -----

Voo	dAth	dAthmax	prc(u)	prl(u)	pra(u)	ps(u)
GLO1290	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500
TAM3920	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500
TAM3115	7	30	0.005	0.414	0.740	0.500
GLO1334	11	30	0.005	0.552	0.740	0.500
GLO1328	8	30	0.005	0.448	0.740	0.500
TAM3138	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500
GLO1520	9	30	0.005	0.483	0.740	0.500
TAM3214	10	30	0.005	0.517	0.740	0.500
GLO1322	10	30	0.005	0.517	0.740	0.500
GLO1386	6	30	0.005	0.379	0.740	0.500
TAM3922	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500
GLO1310	6	30	0.005	0.379	0.740	0.500
GLO1972	6	30	0.005	0.379	0.740	0.500
TAM3462	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500
GLO1522	6	30	0.005	0.379	0.740	0.500
GLO1854	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500
TAM3039	4	30	0.005	0.310	0.740	0.500
TAM3274	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500
GLO1220	0	30	0.005	0.547	0.740	0.500

Figura B.5 – Saída das rejeitabilidades e seletibilidade para decisões GDP.

SatisficingFunctions para decisões GDP. A Figura B.6 apresenta a tela que o protótipo emite, contendo a sequência sugerida de decolagens para o caso de decisões GDP.

----- Takeoff sequence -----

Sequencial	Voos
1	GLO1610, VRN8698, ONE6174
2	TAM3301
3	GLO7600, GLO7488
4	PTB1488
5	GLO1872
6	GLO1774
7	GLO1902, GLO1664, TAM9364, WEB6761
8	GLO1644, TAM3157
9	GLO1334
10	GLO1290, TAM3920, TAM3138, TAM3922, TAM3462, GLO1854, TAM3274, GLO1220
11	TAM3848
12	TAM3214, GLO1322
13	GLO1520
14	TAM9566
15	GLO1328
16	TAM3115
17	GLO1386, GLO1310, GLO1972, GLO1522
18	GLO7452
19	TAM3039

Figura B.6 – Tela de sugestão de sequência de pouso.

O Protótipo *SatisficingCDM* foi construído para processar dados de tráfego de aéreo, portanto foi necessário criar um modelo de dados para armazenar registros de voos, aeroportos e área terminal. Deste modo, o modelo de dados implementa tabelas com nomes significativos conforme descrito a seguir:

- Tabela *tb_flight*: Esta tabela contém os registros dos voos que desejam decolar ou

pousar nos aeroportos da TMA-SP;

- Tabela **tb_airport**: É destinada armazenar os registros dos aeroportos da TMA-SP;
- Tabela **tb_tma**: Esta tabela contém os dados da TMA-SP;
- Tabela **tb_result**: Armazena as sugestões geradas pelo protótipo.

O diagrama de banco de dados apresentado na Figura B.7 apresenta as tabelas com as quais o Protótipo *SatisficingCDM* faz interação através da camada de persistência.

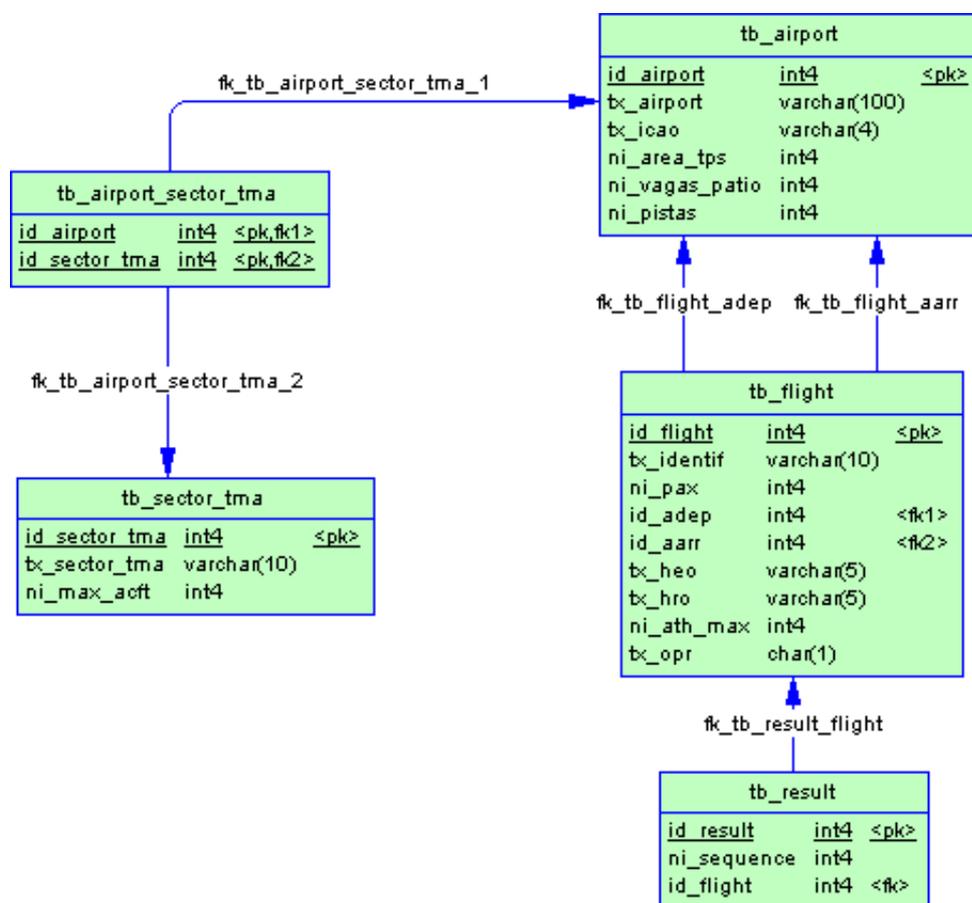


Figura B.7 – Modelo de dados do Protótipo *SatisficingCDM*

ANEXO C - CARTAS DE ESTACIONAMENTO DE AERÓDROMO DE GUARULHOS

C.1 APRESENTAÇÃO

Este anexo visa apresentar as Cartas de Estacionamento de Aeródromo do Aeroporto de Guarulhos, cujo código internacional de localidade da Organização Internacional da Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization - ICAO*) é SBGR. Estas cartas podem ser obtidas gratuitamente no endereço eletrônico do [Serviço de Informações Aeronáuticas](#) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo ([BRASIL, 2014](#)).

CARTA DE ESTACIONAMENTO (PDC)
 PARKING CHART (PDC)

SÃO PAULO / Guarulhos - Gov André Franco Montoro, INTL (SBGR)
 SP-BRASIL

ARP S23 26 08 WD46 28 23

PDC 1 ELEV 2459'

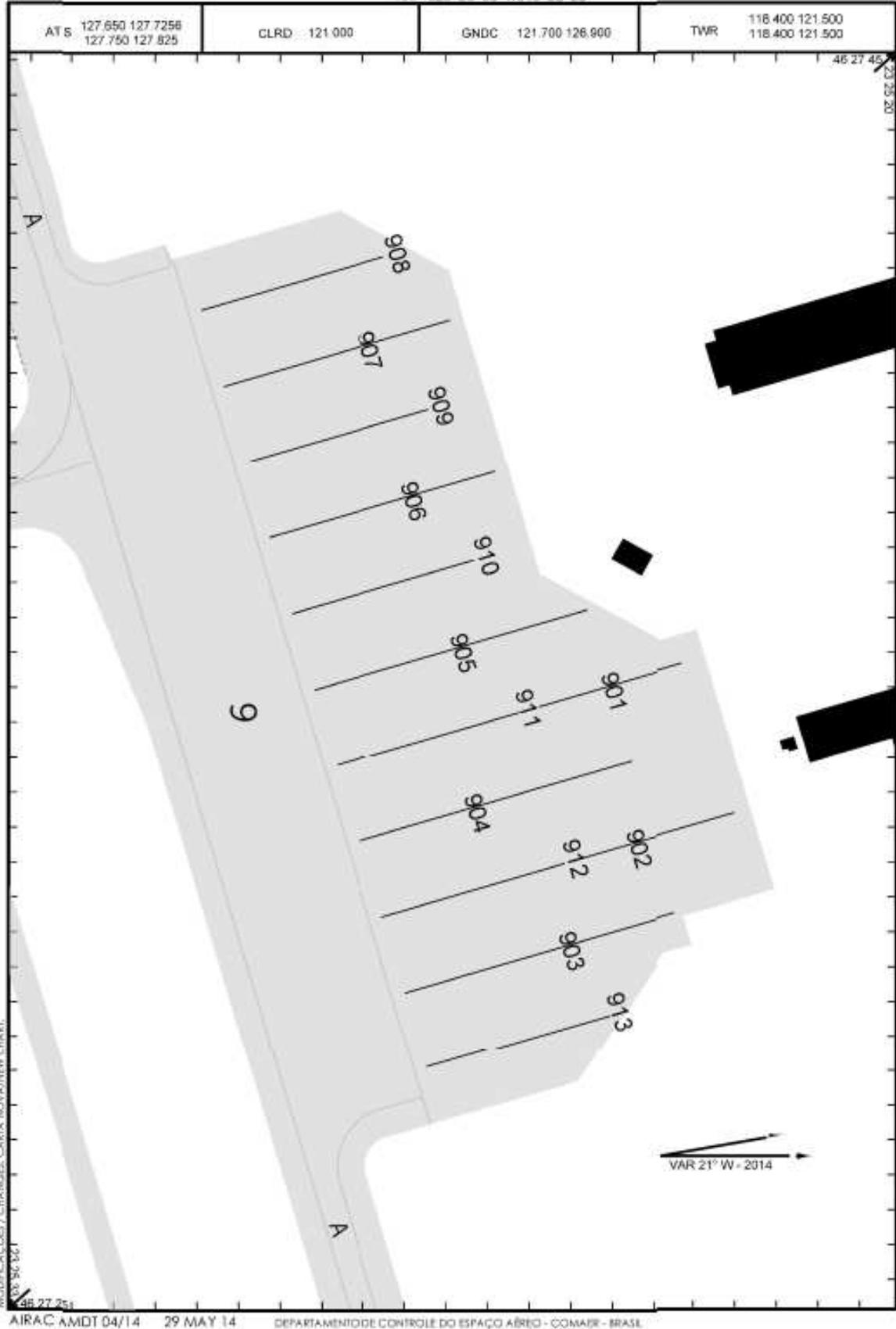


Figura C.1 – Carta de Estacionamento 1 de Guarulhos

COORDENADAS DOS PONTOS DE ESTACIONAMENTO PARKING SPOT COORDINATES					
PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES	PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES	PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES
APDC 9					
901	23 25 26.98 S 46 27 36.65 W				
902	23 25 26.34 S 46 27 34.28 W				
903	23 25 27.89 S 46 27 32.50 W				
904	23 25 28.53 S 46 27 34.87 W				
905	23 25 29.17 S 46 27 37.24 W				
906	23 25 29.81 S 46 27 39.60 W				
907	23 25 30.45 S 46 27 41.97 W				
908	23 25 30.15 S 46 27 43.35 W				
909	23 25 29.51 S 46 27 40.98 W				
910	23 25 28.87 S 46 27 38.62 W				
911	23 25 28.23 S 46 27 36.25 W				
912	23 25 27.59 S 46 27 33.88 W				
913	23 25 26.95 S 46 27 31.52 W				

MODIFICAÇÕES / CHANGES: CARTA NOVA/NEW CHART.

Figura C.2 – Carta de Estacionamento 1 de Guarulhos - Informações complementares

CARTA DE ESTACIONAMENTO (PDC)
 PARKING CHART (PDC)

SÃO PAULO / Guarulhos - Gov André Franco Montoro, INTL (SBGR)
 SP-BRASIL

ARP S23 26 08 W046 28 23

PDC 2 ELEV 2459'

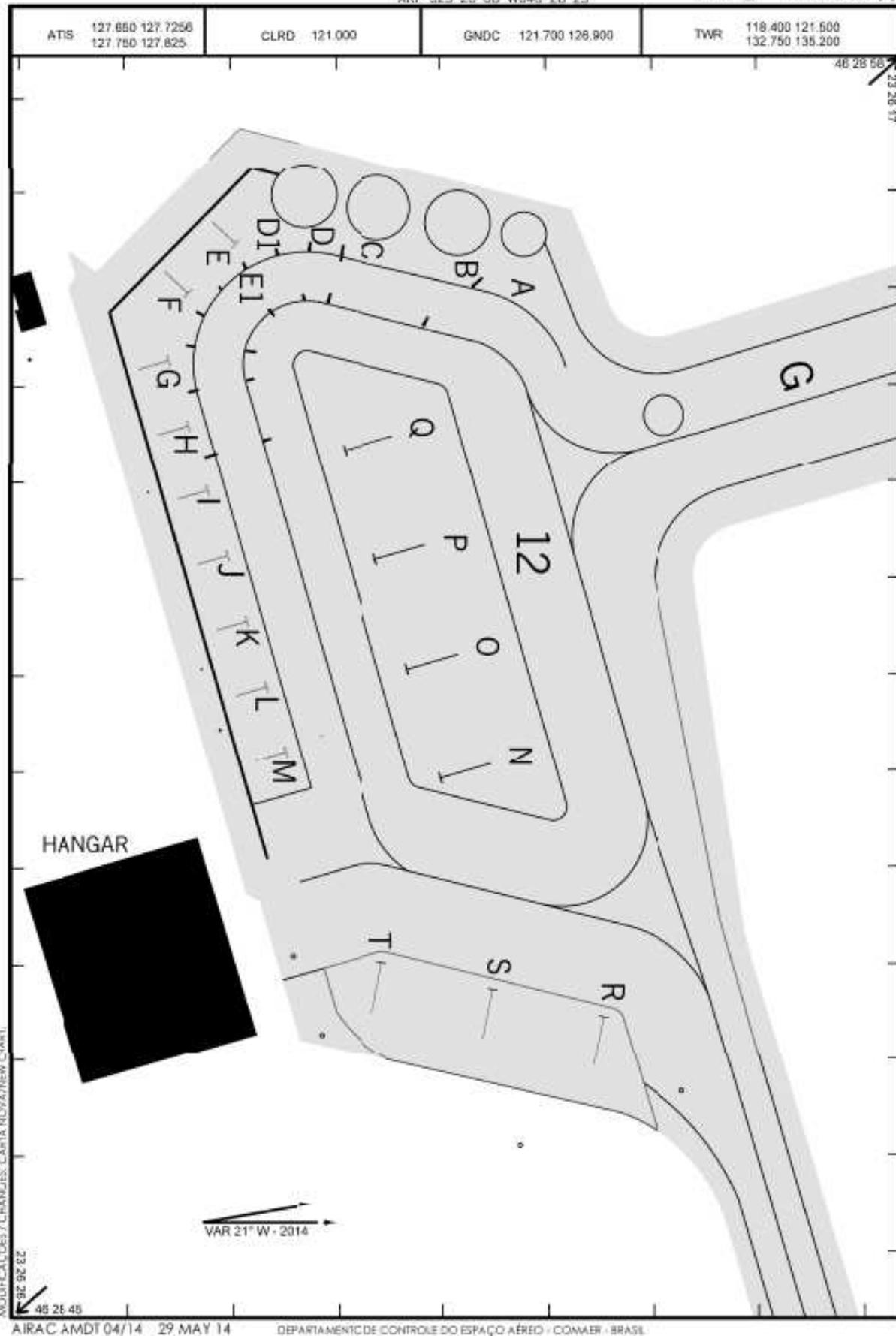


Figura C.3 – Carta de Estacionamento 2 de Guarulhos
 140

COORDENADAS DOS PONTOS DE ESTACIONAMENTO PARKING SPOT COORDINATES					
PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES		PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES	
A	23 26 23.00 S	46 28 58.14 W			
B	23 26 23.62 S	46 28 58.26 W			
C	23 26 24.38 S	46 28 58.42 W			
D	23 26 25.09 S	46 28 58.55 W			
D1	23 26 25.32 S	46 28 58.09 W			
E	23 26 25.74 S	46 28 58.05 W			
E1	23 25 26.04 S	46 28 57.55 W			
F	23 26 26.19 S	46 28 57.54 W			
G	23 25 26.37 S	46 28 56.85 W			
H	23 26 26.18 S	46 28 56.18 W			
I	23 26 26.01 S	46 28 55.50 W			
J	23 26 25.81 S	46 28 54.83 W			
K	23 26 25.63 S	46 28 54.15 W			
L	23 26 25.45 S	46 28 53.48 W			
M	23 26 25.26 S	46 28 52.80 W			
N	23 26 24.12 S	46 28 53.64 W			
O	23 26 24.12 S	46 28 53.64 W			
P	23 26 24.36 S	46 23 54.78 W			
Q	23 26 24.72 S	46 28 55.91 W			
R	23 26 22.27 S	46 28 50.06 W			
S	23 26 23.31 S	46 23 50.34 W			
T	23 26 24.36 S	46 28 50.62 W			

MODIFICAÇÕES / CHANGES: CARTA NOVA/NEW CHART.

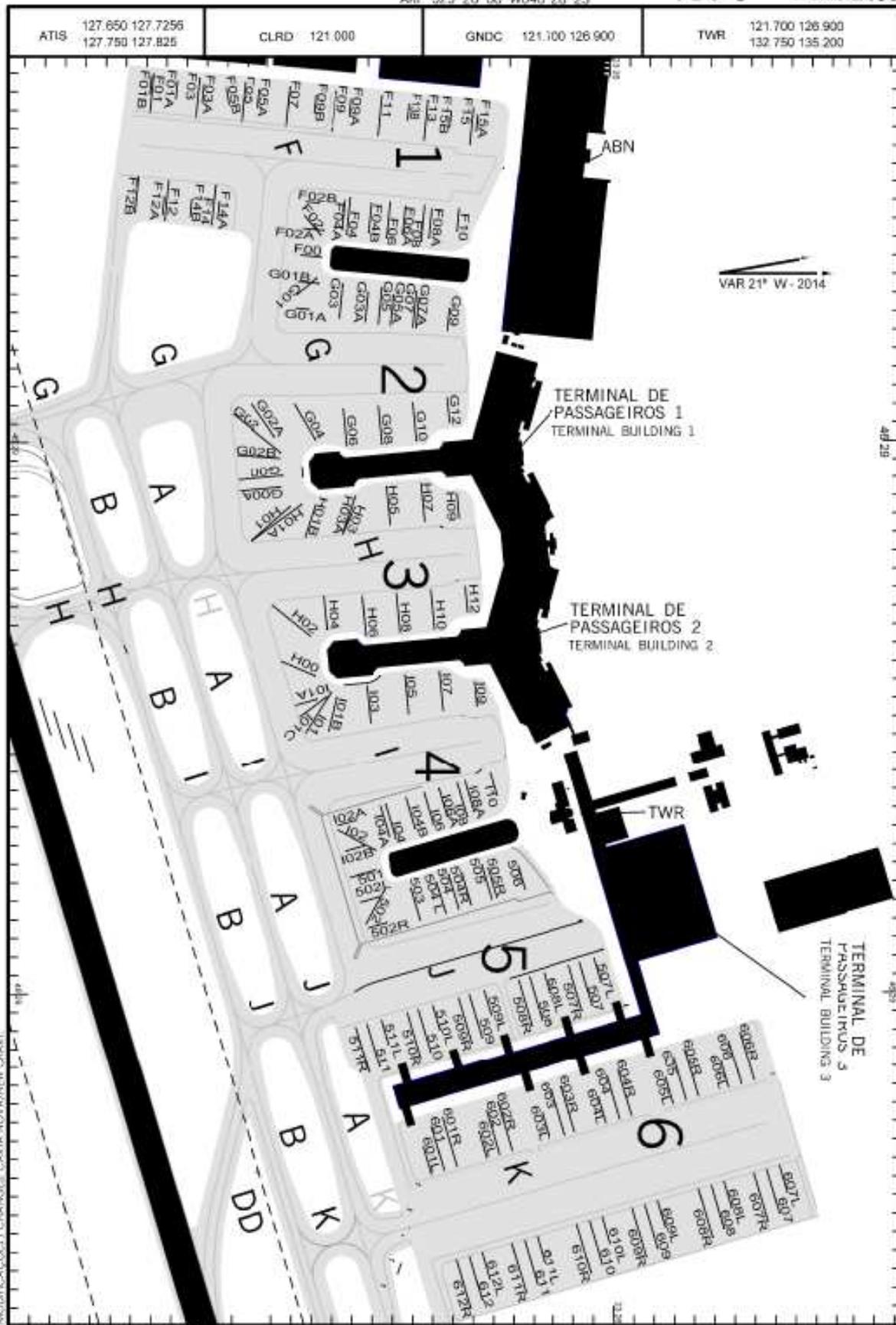
Figura C.4 – Carta de Estacionamento 2 de Guarulhos - Informações complementares

CARTA DE ESTACIONAMENTO (PDC)
 PARKING CHART (PDC)

SÃO PAULO / Guarulhos - Gov André Franco Montoro, INTL (SBGR)
 SP-BRASIL

ARP 523 26 D8 WD46 28 23

PDC 3 ELEV 2459'



AIRAC AMDT 04/14 29 MAY 14

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO - COMAER - BRASIL

Figura C.5 – Carta de Estacionamento 3 de Guarulhos

COORDENADAS DOS PONTOS DE ESTACIONAMENTO PARKING SPOT COORDINATES					
PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES	PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES	PONTO SPOT	COORDENADAS COORDINATES
	APDC 1		APDC 3		APDC 5
F00	23 25 44.34 S 46 29 9.96 W	H00	23 25 44.71 S 46 28 47.25 W	510	23 25 40.94 S 46 28 28.13 W
F02A	23 25 44.21 S 46 29 11.39 W	H02	23 25 44.97 S 46 28 49.43 W	510R	23 25 41.44 S 46 28 27.34 W
F02	23 25 44.35 S 46 29 11.13 W	H04	23 25 44.11 S 46 28 49.78 W	511L	23 25 43.01 S 46 28 28.14 W
F02B	23 25 44.45 S 46 29 12.87 W	H06	23 25 42.21 S 46 28 49.44 W	511	23 25 43.42 S 46 28 27.4 W
F04A	23 25 43.30 S 46 29 11.43 W	H08	23 25 40.51 S 46 28 49.61 W	511R	23 25 41.31 S 46 28 23.2 W
F04	23 25 43.08 S 46 29 11.15 W	H10	23 25 38.81 S 46 28 49.78 W		
F04B	23 25 42.01 S 46 29 11.25 W	H12	23 25 37.17 S 46 28 50.68 W		APDC 6
F06	23 25 41.11 S 46 29 10.97 W	H09	23 25 37.71 S 46 28 57.08 W	601L	23 25 41.31 S 46 28 22.10 W
F06A	23 25 40.33 S 46 29 11.15 W	H07	23 25 39.47 S 46 28 57.65 W	601	23 25 41.31 S 46 28 24.9 W
F08	23 25 39.42 S 46 29 10.79 W	H05	23 25 41.17 S 46 28 57.48 W	601R	23 25 40.38 S 46 28 24.17 W
F08A	23 25 39.03 S 46 29 10.86 W	H03	23 25 42.73 S 46 28 56.37 W	602L	23 25 38.60 S 46 28 23.14 W
F10	23 25 37.65 S 46 29 11.34 W	H03A	23 25 42.71 S 46 28 56.67 W	602	23 25 38.21 S 46 28 25.16 W
F15	23 25 36.84 S 46 29 18.05 W	H01B	23 25 44.68 S 46 28 56.48 W	602R	23 25 37.67 S 46 28 25.9 W
F15A	23 25 36.63 S 46 29 17.67 W	H01	23 25 45.37 S 46 28 56.53 W	603L	23 25 35.52 S 46 28 24.12 W
F15B	23 25 37.95 S 46 29 17.87 W	H01A	23 25 45.95 S 46 28 56.41 W	603	23 25 35.02 S 46 28 26.8 W
F13	23 25 39.09 S 46 29 18.47 W			603R	23 25 34.55 S 46 28 26.5 W
F13B	23 25 40.03 S 46 29 18.25 W		APDC 4	604L	23 25 32.74 S 46 28 25.10 W
F11	23 25 41.35 S 46 29 18.72 W	102B	23 25 42.34 S 46 28 37.66 W	604	23 25 32.30 S 46 28 26.13 W
F09	23 25 43.62 S 46 29 18.97 W	102	23 25 41.76 S 46 28 37.12 W	604R	23 25 31.78 S 46 28 27.13 W
F09A	23 25 42.89 S 46 29 18.51 W	102A	23 25 42.72 S 46 28 39.14 W	605L	23 25 29.48 S 46 28 26.13 W
F09B	23 25 44.59 S 46 29 18.75 W	104A	23 25 41.07 S 46 28 38.47 W	605	23 25 29.08 S 46 28 27.16 W
F07	23 25 45.88 S 46 29 19.21 W	104	23 25 40.75 S 46 28 38.16 W	605R	23 25 28.55 S 46 28 26.19 W
F05	23 25 48.15 S 46 29 19.45 W	104B	23 25 39.81 S 46 28 38.67 W	606L	23 25 26.78 S 46 28 27.19 W
F05A	23 25 47.41 S 46 29 19.07 W	106	23 25 38.90 S 46 28 39.12 W	606	23 25 26.39 S 46 28 28.10 W
F05B	23 25 49.11 S 46 29 19.14 W	106A	23 25 38.23 S 46 28 39.54 W	606R	23 25 25.85 S 46 28 29.15 W
F03A	23 25 50.20 S 46 29 19.35 W	108	23 25 37.22 S 46 28 39.50 W	607L	23 25 23.57 S 46 28 20.75 W
F03	23 25 50.42 S 46 29 19.71 W	108A	23 25 36.89 S 46 28 39.19 W	607	23 25 23.95 S 46 28 19.15 W
F01A	23 25 51.50 S 46 29 19.52 W	110	23 25 35.76 S 46 28 40.67 W	607R	23 25 24.50 S 46 28 19.9 W
F01B	23 25 52.80 S 46 29 19.75 W	109	23 25 36.83 S 46 28 46.67 W	608L	23 25 26.26 S 46 28 19.10 W
F01	23 25 52.68 S 46 29 19.66 W	107	23 25 36.59 S 46 28 47.43 W	608	23 25 26.26 S 46 28 19.10 W
F14	23 25 49.83 S 46 29 11.72 W	105	23 25 40.30 S 46 28 47.16 W	608R	23 25 26.26 S 46 28 19.10 W
F14A	23 25 49.56 S 46 29 12.03 W	103	23 25 42.16 S 46 28 46.66 W	609L	23 25 29.48 S 46 28 18.17 W
F14B	23 25 50.91 S 46 29 12.15 W	101B	23 25 43.64 S 46 28 46.08 W	609	23 25 29.86 S 46 28 17.7 W
F12	23 25 52.15 S 46 29 11.96 W	101	23 25 43.84 S 46 28 46.10 W	609R	23 25 30.41 S 46 28 17.1 W
F12A	23 25 52.26 S 46 29 12.29 W	101C	23 25 44.16 S 46 28 46.10 W	610L	23 25 32.17 S 46 28 17.12 W
F12B	23 25 53.62 S 46 29 12.42 W	101A	23 25 44.62 S 46 28 45.69 W	610	23 25 32.55 S 46 28 16.12 W
	APDC 2		APDC 5	610R	23 25 35.39 S 46 28 17.10 W
G00A	23 25 46.41 S 46 28 57.49 W	501	23 25 43.59 S 46 28 38.25 W	611L	23 25 35.77 S 46 28 15.19 W
G00	23 25 46.29 S 46 28 58.12 W	502I	23 25 43.45 S 46 28 36.77 W	611	23 25 36.32 S 46 28 15.3 W
G02	23 25 46.39 S 46 28 59.43 W	502	23 25 41.32 S 46 28 35.57 W	611R	23 25 38.08 S 46 28 16.5 W
G02A	23 25 46.71 S 46 29 0.25 W	S02R	23 25 42.84 S 46 28 35.45 W	612L	23 25 38.46 S 46 28 15.14 W
G02B	23 25 46.46 S 46 28 59.12 W	503	23 25 40.03 S 46 28 35.66 W	612	23 25 39.01 S 46 28 14.18 W
G04	23 25 44.66 S 46 29 0.11 W	504L	23 25 38.81 S 45 28 35.95 W	612R	
G06	23 25 43.09 S 46 28 59.79 W	504	23 25 38.16 S 46 28 36.37 W		
G08	23 25 41.38 S 46 28 59.67 W	504R	23 25 37.51 S 45 28 36.43 W		
G10	23 25 39.68 S 46 29 0.04 W	505	23 25 36.53 S 45 28 36.86 W		
G12	23 25 38.04 S 46 29 0.97 W	505R	23 25 36.21 S 45 28 36.70 W		
G09	23 25 38.03 S 46 29 7.14 W	506	23 25 34.70 S 46 28 36.76 W		
G07A	23 25 39.52 S 46 29 7.91 W	507L	23 25 32.59 S 46 28 31.95 W		
G07	23 25 39.66 S 46 29 8.06 W	507	23 25 33.03 S 46 28 30.74 W		
G05A	23 25 40.78 S 46 29 8.11 W	507R	23 25 33.54 S 46 28 30.45 W		
G05	23 25 41.36 S 46 29 8.27 W	508L	23 25 35.05 S 46 28 31.78 W		
G03A	23 25 42.07 S 46 29 8.17 W	508	23 25 35.53 S 45 28 29.92 W		
G03	23 25 43.33 S 46 29 8.52 W	508R	23 25 36.02 S 46 28 29.66 W		
G01A	23 25 44.98 S 46 29 7.14 W	509L	23 25 38.02 S 46 28 30.27 W		
G01	23 25 44.57 S 46 29 8.81 W	509	23 25 38.45 S 46 28 29.02 W		
G01B	23 25 44.47 S 46 29 8.52 W	509R	23 25 38.95 S 46 28 28.73 W		
		510L	23 25 40.50 S 46 28 29.44 W		

MODIFICAÇÕES / CHANGES: CARTA NOVA/NEW CHART.

Figura C.6 – Carta de Estacionamento 3 de Guarulhos - Informações complementares

ANEXO D - CARTA DE ESTACIONAMENTO DE AERÓDROMO DE CONGONHAS

D.1 APRESENTAÇÃO

Este anexo visa apresentar as Cartas de Estacionamento de Aeródromo do Aeroporto de Congonhas, cujo código internacional de localidade da ICAO é SBSP. Estas cartas podem ser obtidas gratuitamente no endereço eletrônico do [Serviço de Informações Aero-náuticas](#) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (BRASIL, 2014).

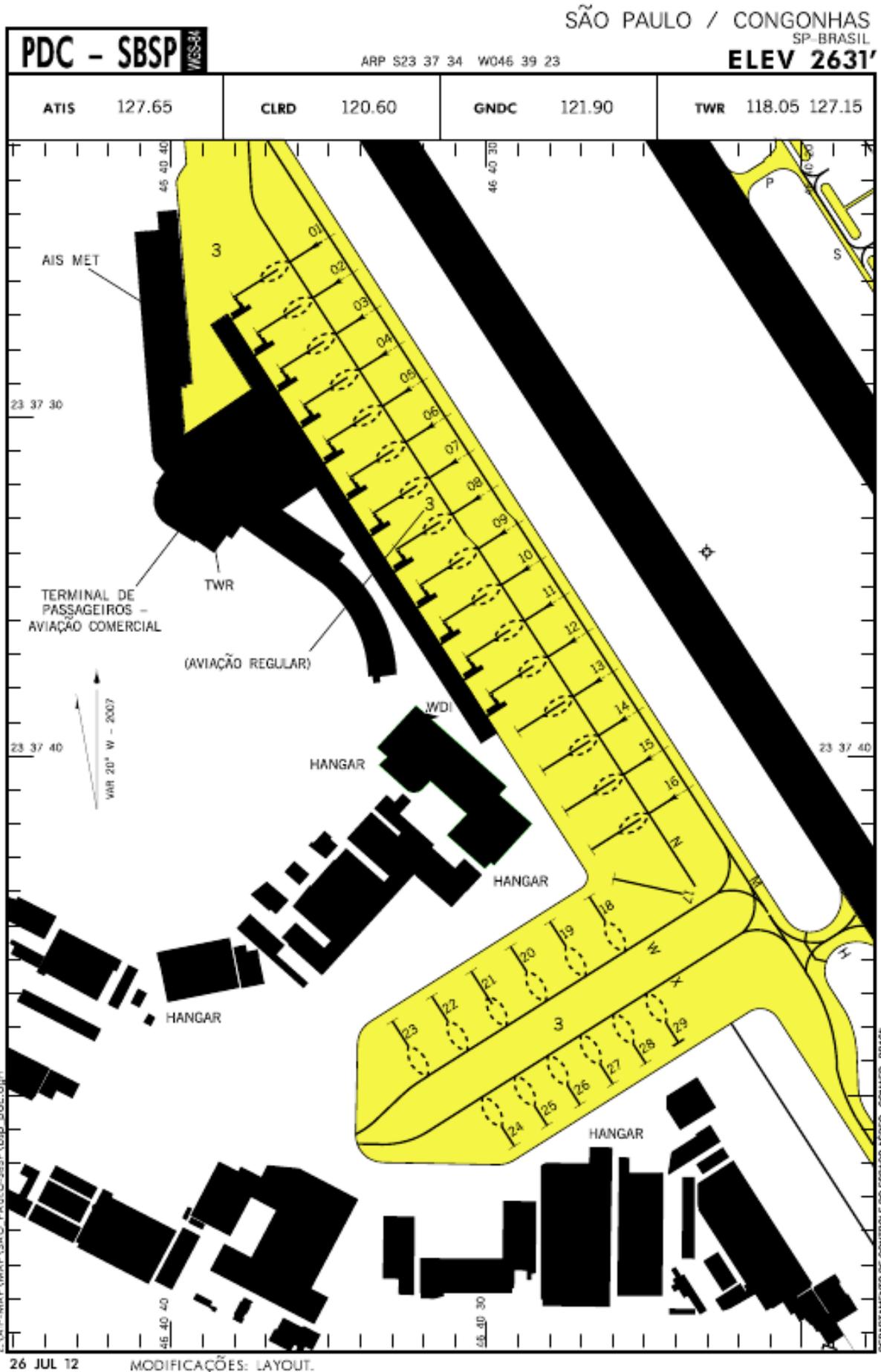


Figura D.1 – Carta de Estacionamento de Congonhas

PDC – SBSP: INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

COORDENADAS DOS PONTOS DE ESTACIONAMENTO			
PONTO NR	COORDENADAS	ACL	COORDENADAS DOS INS
PÁTIO 3			PONTO NR COORDENADAS
1	S23 37.44 / W046 39.63	2590'	
2	S23 37.45 / W046 39.62	2590'	
3	S23 37.48 / W046 39.61	2593'	
4	S23 37.49 / W046 39.60	2595'	
5	S23 37.51 / W046 39.58	2597'	
6	S23 37.53 / W046 39.57	2597'	
7	S23 37.55 / W046 39.56	2597'	
8	S23 37.56 / W046 39.55	2599'	
9	S23 37.58 / W046 39.53	2600'	
10	S23 37.60 / W046 39.52	2505'	
11	S23 37.62 / W046 39.51	2604'	
12	S23 37.63 / W046 39.50	2606'	
13	S23 37.65 / W046 39.48	2606'	
14	S23 37.67 / W046 39.47	2608'	
15	S23 37.69 / W046 39.46	2609'	
16	S23 37.71 / W046 39.44	2610'	
17	S23 37.72 / W046 39.43	2612'	
18	S23 37.74 / W046 39.45	2610'	
19	S23 37.75 / W046 39.47	2609'	
20	S23 37.76 / W046 39.49	2608'	
21	S23 37.77 / W046 39.51	2607'	
22	S23 37.78 / W046 39.53	2605'	
23	S23 37.80 / W046 39.55	2604'	
24	S23 37.86 / W046 39.48	2610'	
25	S23 37.85 / W046 39.47	2611'	
26	S23 37.84 / W046 39.45	2612'	
27	S23 37.83 / W046 39.43	2614'	
28	S23 37.82 / W046 39.42	2615'	
29	S23 37.81 / W046 39.40	2616'	
RMK: NIL			

Z:\KIP-MA\MA\P33\AO_PAULO-SBSP\map_pdc.dgn

26 JUL 12

Figura D.2 – Carta de Estacionamento de Congonhas - Informações complementares