

CATEGORIA 1

MELHOR MONOGRAFIA



1º *Lugar*

O44M

CÍCERO ROBERTO FERREIRA DE ALMEIDA

50 *Anos*

BRASÍLIA - DF

Uma Abordagem de Tomada de
Decisão Colaborativa Baseada em
Jogos *Satisficing* para Aeroportos

Concurso de Monografia

Prêmio de Desenvolvimento e Inovação da Aviação Civil

Categoria: Melhor Monografia

Tema do trabalho: Gestão Aeroportuária

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

RESUMO

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.

SUMÁRIO

RESUMO	2
1. INTRODUÇÃO.....	5
1.1. APRESENTAÇÃO.....	5
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	6
1.3. HIPÓTESE	7
1.4. JUSTIFICATIVA	7
1.5. OBJETIVOS	9
1.6. METODOLOGIA DE PESQUISA	10
1.7. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1. TEORIA DOS JOGOS	12
2.2. TEORIA DOS JOGOS <i>SATISFICING</i>	14
2.2.1. Racionalidade	15
2.2.2. Praxiologia.....	16
2.2.3. Teoria da Utilidade Praxiológica.....	16
3. FUNÇÕES DE PREFERÊNCIA DAS ENTIDADES	19
3.1. FUNÇÕES DE PREFERÊNCIAS PARA CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO 19	
3.2. FUNÇÕES DE PREFERÊNCIAS PARA EMPRESAS AÉREAS.....	21
3.3. FUNÇÕES DE PREFERÊNCIAS PARA AEROPORTOS.....	22
4. METODOLOGIA DE GESTÃO DA TOMADA DE DECISÃO	24
4.1. APRESENTAÇÃO.....	24
4.2. ETAPA 1 MAPEAR E DEFINIR AS FUNÇÕES DE PREFERÊNCIA.....	24
4.3. ETAPA 2 – DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE DECISÃO	24
4.4. ETAPA 3 – ELABORAR O MODELO <i>SATISFICING</i>	26
4.5. ETAPA 4 – DEFINIÇÃO DAS POLÍTICAS DE PRIORIDADE POR TIPO DE OPERAÇÃO E ENTIDADE.....	34
4.6. ETAPA 5 – DEFINIÇÃO DE REGRAS.....	35
4.6.1. Regras de Segurança.....	35
4.6.2. Regras de Sequenciamento GDP.....	36
4.6.3. Regras de Sequenciamento AHP	38
4.7. ETAPA 6 – IDENTIFICAR TODAS AS OPÇÕES DE DECISÃO.....	39
4.8. ETAPA 7 – DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	40
4.9. ETAPA 8 – TOMADA DE DECISÃO	40
4.9.1. Tomada de decisão GDP	40
4.9.2. Tomada de decisão AHP	41
4.10. TÓPICOS CONCLUSIVOS	42
5. TOMADA DE DECISÃO EM AEROPORTOS DA TMA-SP	44
5.1. APRESENTAÇÃO.....	44
5.2. DESCRIÇÃO DE CENÁRIOS E DADOS	44
5.3. PLANEJAMENTO DO ESTUDO DE CASO	46
5.4. DECISÕES GDP EM CENÁRIO DE ALTO FLUXO	46
5.5. DECISÕES AHP EM CENÁRIO DE ALTO FLUXO	49
5.6. DECISÕES GDP EM CENÁRIO DE BAIXO FLUXO	53
5.7. TÓPICOS CONCLUSIVOS	54
6. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	56
6.1. Caso 1: Decisões GDP em alto fluxo	56
6.2. Caso 2: Decisões AHP em alto fluxo	58
6.3. Caso 3: Decisões GDP em baixo fluxo	59

6.3. TÓPICOS CONCLUSIVOS	60
7. CONCLUSÕES	62
7.1. APRESENTAÇÃO.....	62
7.2. COMPARAÇÃO COM OUTRAS METODOLOGIAS	63
7.3. CONTRIBUIÇÕES	64
7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO A. ALGORITMOS	71
A.1. APRESENTAÇÃO.....	71
A.1.1. Algoritmo de rejeitabilidade	71
A.1.2. Algoritmo de seletibilidade.....	73
A.1.3. Algoritmo <i>Satisficing</i>	73
ANEXO B. PROJETO E PROTÓTIPO COMPUTACIONAL	74
B.1. APRESENTAÇÃO	74
B.1.1. Arquitetura do protótipo <i>SatisficingCDM</i>	74
B.1.2. Padrão de nomenclatura de classes e atributos	74
B.2. SUBMÓDULOS	75
B.3. INTERAÇÃO ENTRE OS MÓDULOS.....	75
C.1. APRESENTAÇÃO.....	77
ANEXO D. CARTA DE ESTACIONAMENTO DE AERÓDROMO DE CONGONHAS	78
D.1. APRESENTAÇÃO.....	78

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, 2014b) 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 e 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).

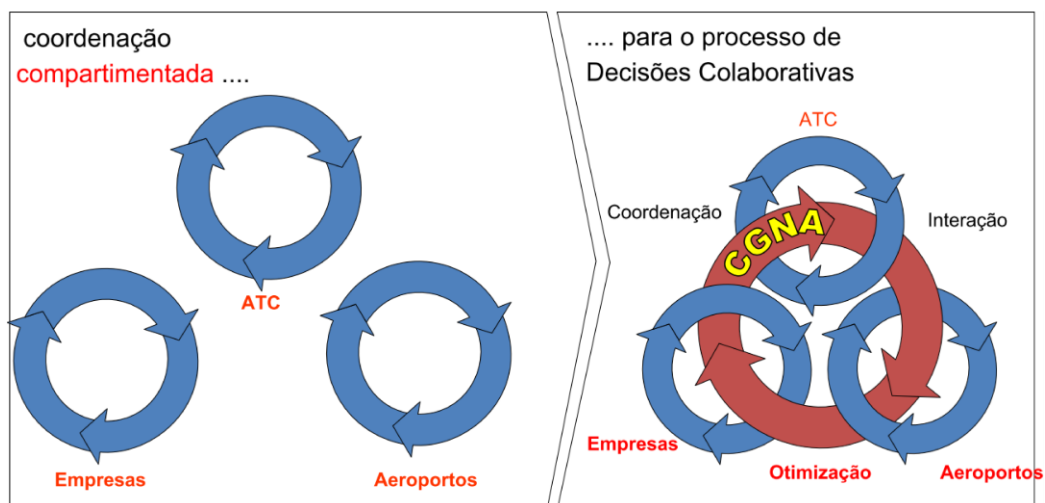


Figura 1.1: Modelo Compartimentado e CDM - Fonte: (Brasil, 2013).

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 seis etapas apresentadas de forma sistematizada na Figura 1.2.

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 apresenta 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 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.

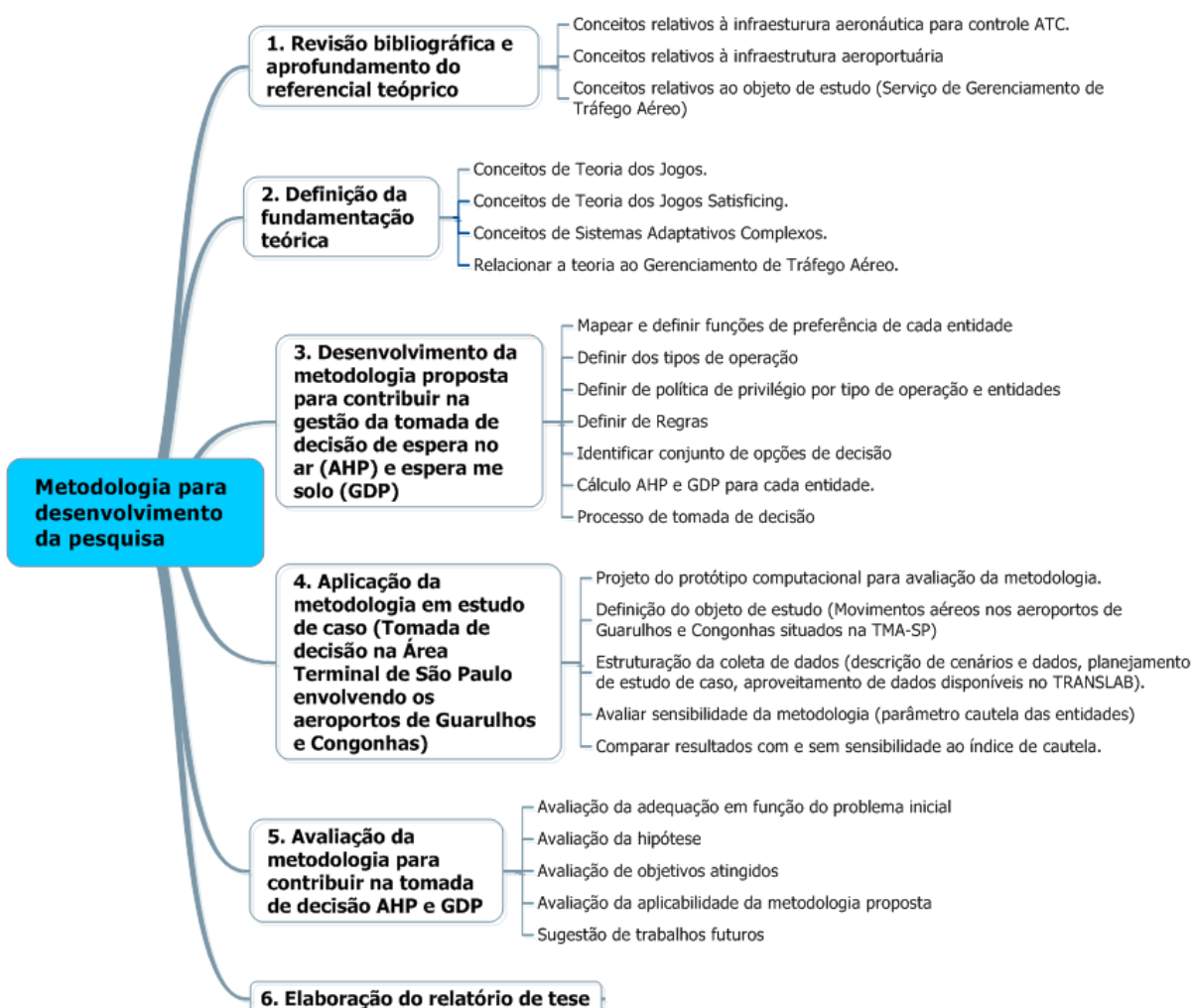


Figura 1.2: Estrutura da metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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.

2.1. 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 (1978) 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 e 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.

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 e 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: $U(S) \rightarrow \mathfrak{R}$, 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 e 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. 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 suplantar, 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 e 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 aos interesses de outros participantes, até mesmo seu próprio custo individual. Cooperação verdadeira é muito difícil de gerar com racionalidade individual (Stirling, 2003).

2.2.1. 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 seguintes 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.

2.2.2. 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.

2.2.3. 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 2.3.1, 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 2.3.1 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.

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

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).

3. 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.

3.1. FUNÇÕES DE PREFERÊNCIAS PARA CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO

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. Neste serviço 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 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:

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

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 $\varepsilon = N(x) \times 0.8 - \lfloor N(x) \times 0.8 \rfloor$.

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:

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

3.2. 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 e 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 estimado 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 e 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.

3.3. 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 e 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 e 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 e 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 e 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 .

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 decisões envolve a área terminal, isto é, são decisões que se aplicam geralmente quando os

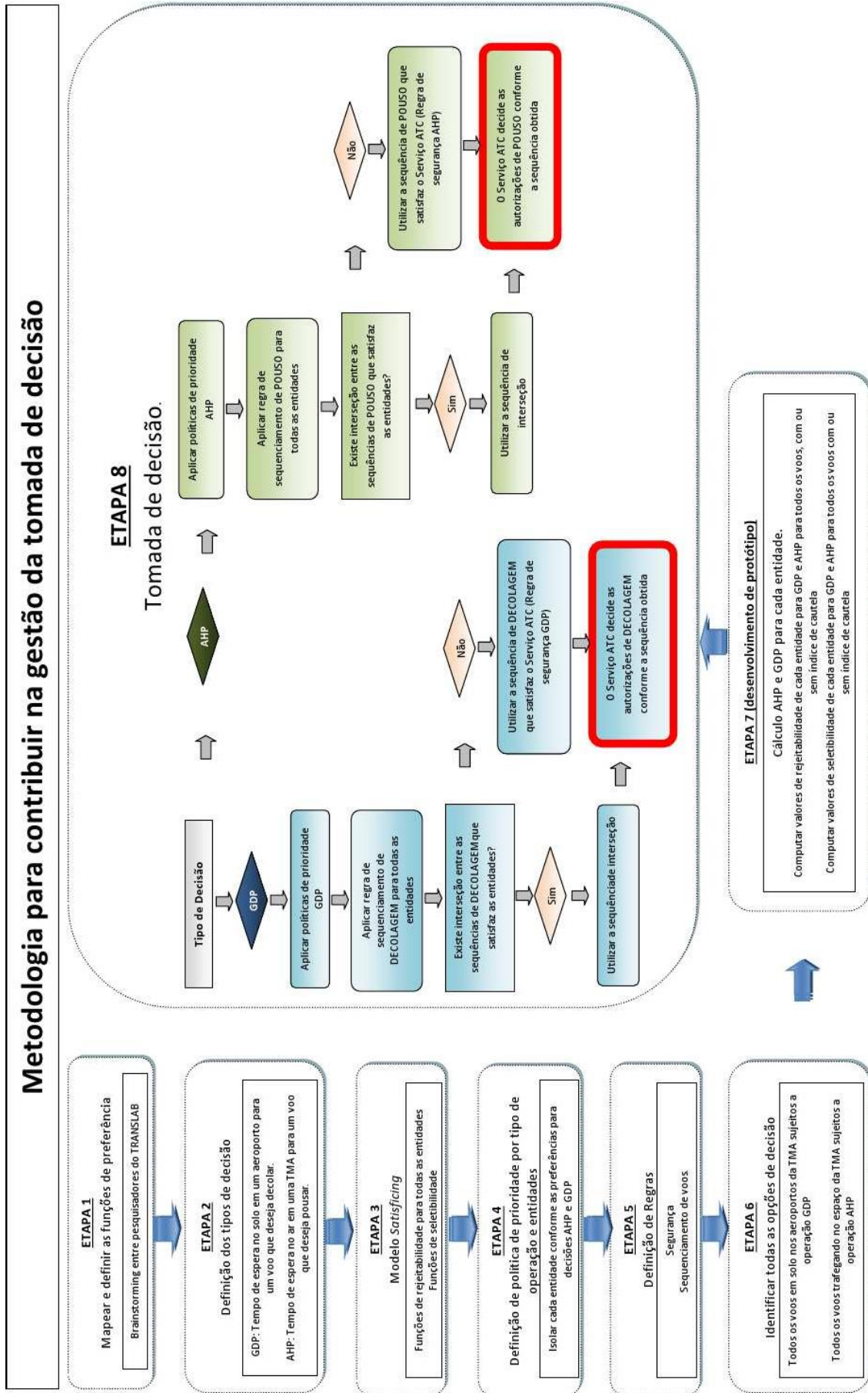


Figura 4.1 Metodologia proposta para contribuir na gestão da tomada de decisão

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 às 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 O 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:

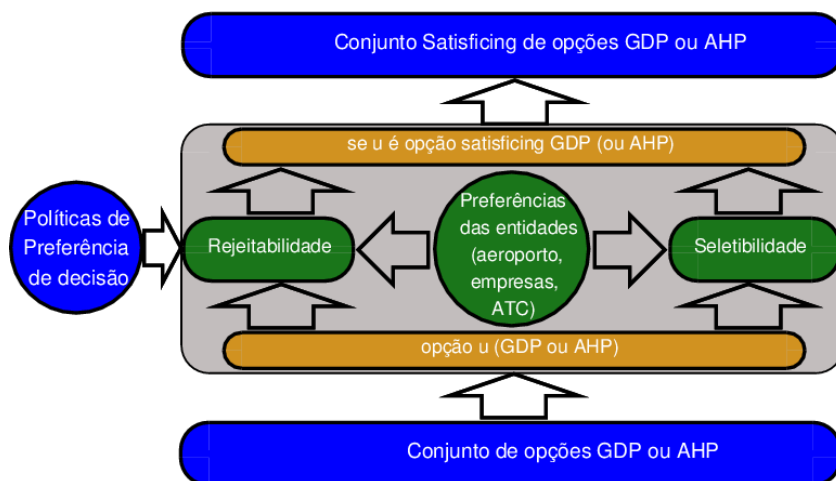


Figura 4.2 – Modelo *Satisficing* CDM.

(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 saturação do setor x é dada pela Equação 4.4.1:

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

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 $C_{S_{\max}}(x)$ para decisões GDP. Então, um primeiro valor de rejeitabilidade ATC pode ser obtido conforme a severidade do congestionamento se aproxima de $C_{S_{\max}}(x)$, conforme a Equação 4.4.2:

$$p_{RC_c} = \begin{cases} \frac{C_s}{C_{S_{\max}}} & \text{caso } c < V(x) \leq N(x) \\ 0 & \text{caso } V(x) \leq c \end{cases} \quad (4.4.2)$$

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:

$$d_{Aah}(x) = \sum_{a \in x} d_{Aah}(a) \quad (4.4.2)$$

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:

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

(4.4.4)

A variação dos tempos AHP na TMA x é definida por $\Delta_{ahp}(x) = d_{Aah}(x) - \mathcal{G}(x, u)$, onde $d_{Aah}(x)$ é o atraso em voo atual e $\mathcal{G}(x, u)$ 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:

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

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:

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

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:

$$p_{RF_L}(u) = \frac{d_{Ath}(a)}{d_{Ath_{max}}(a)} \quad (4.4.8)$$

(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:

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

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 entidades 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 $p_{RC}(u)$ do espaço aéreo controlado, conforme a Equação 4.4.16.

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

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 de 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 $\mu_{gdp_E}(u)$ 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:

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

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 $\mu_{gdp_E}(u_k) \leq \mu_{gdp_E}(u_m)$, 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:

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

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:

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

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 $\mu_{ahp_E}(u)$ 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:

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

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 $\mu_{ahp_C}(u_k) \leq \mu_{ahp_C}(u_m)$, 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:

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

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 os 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.

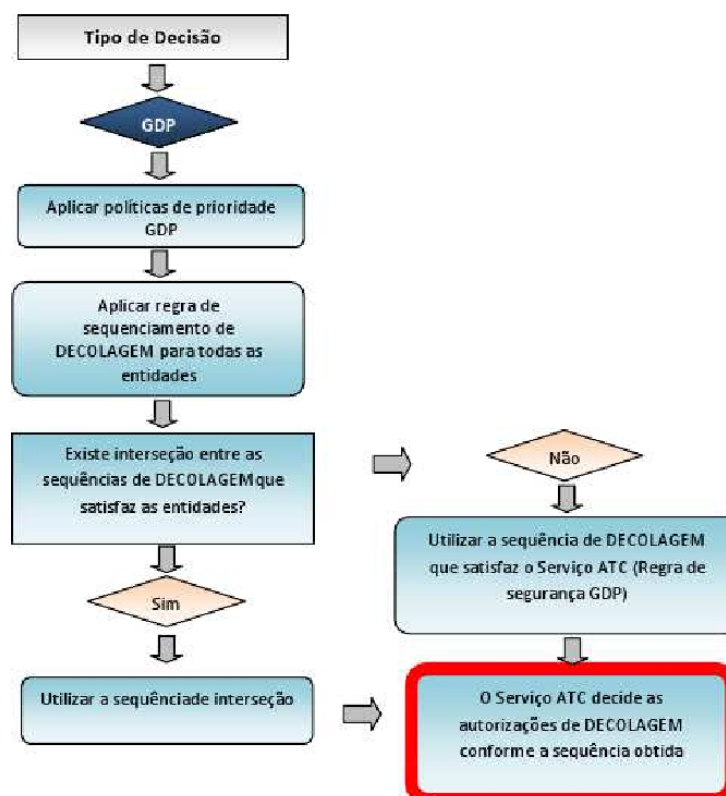


Figura 4.3: Procedimento de tomada de decisão GDP

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.

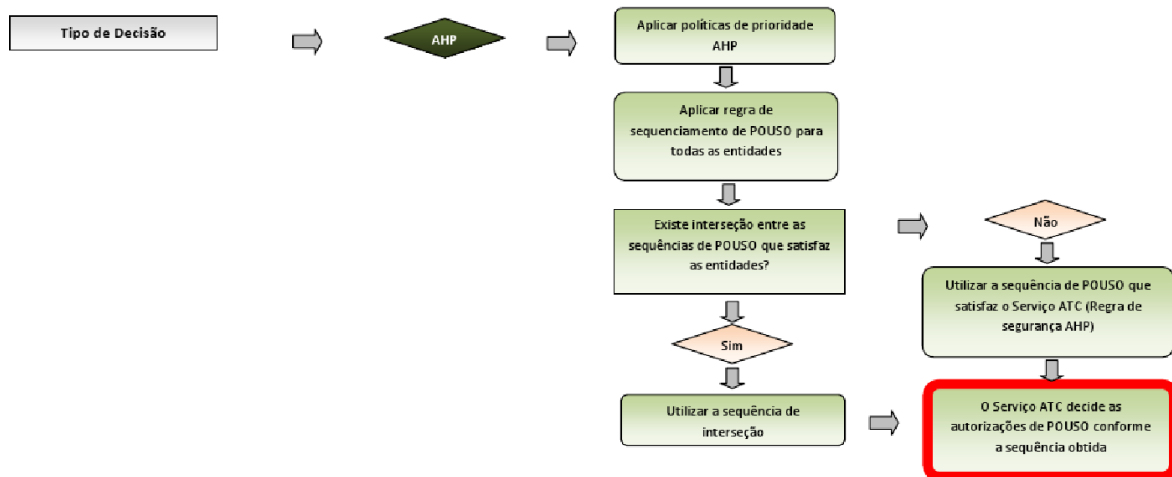


Figura 4.4: Procedimento para tomada de decisão AHP

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 seqüência 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).

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 alto e baixo fluxo foi conduzida 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.

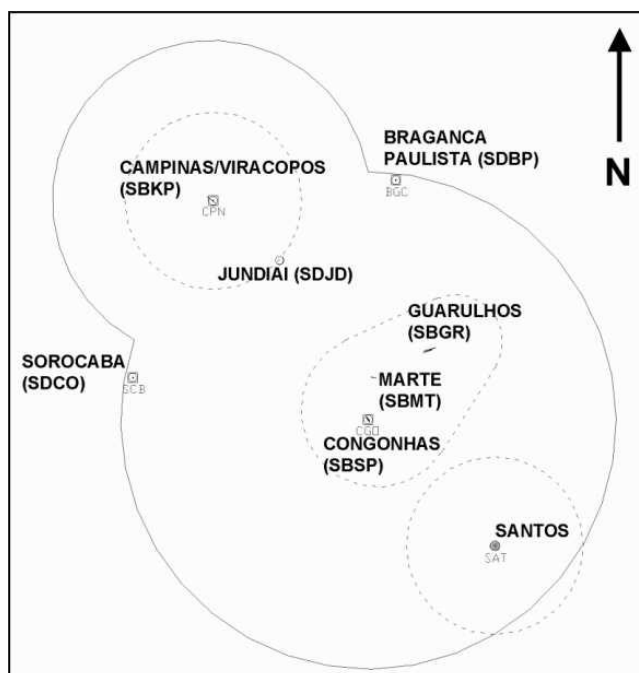


Figura 5.1 – TMA-SP e seus aeroportos. Fonte: (Fraga, 2009)

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, 2014a), 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 DO 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_{Athmax}	$p_{R_C}(u)$	$p_{R_L}(u)$	$p_{R_A}(u)$	$p_S(u)$
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_{Athmax} , 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_{Athmax} 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_{Athmax}	$p_{RC}(u)$	$p_{RL}(u)$	$p_{RA}(u)$	$p_S(u)$
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 $p_{R_C}(u)$ foi obtido da Equação 4.4.2, o valor $p_{R_L}(u)$ foi obtido pelo maior valor dentre as Equações 4.4.6 e 4.4.8 conforme determina o Algoritmo A2 para decisões GDP; o valor $p_{R_A}(u)$ 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 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.

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

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:

- V_{oo} Identificador do voo;
- d_{Ath} Atraso acumulado do voo em minutos - espera no ar;
- $p_{R_c}(u)$ Rejeitabilidade do Serviço ATC à decisão de espera no ar;

- $p_{R_c}(u)$ 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}	$p_{R_c}(u)$	$p_{R_c}(u)$	$p_s(u)$
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}	$p_{R_c}(u)$	$p_{R_c}(u)$	$p_S(u)$
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 $p_{R_C}(u)$ foi obtido da Equação 4.4.4, o valor $p_{R_L}(u)$ 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.

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

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 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_{Athmax}	$p_{R_C}(u)$	$p_{R_L}(u)$	$p_{RA}(u)$	$p_S(u)$
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

Tabela 5.8: Aeronaves no solo de Congonhas (SBSP)

Voo	d_{Ath}	d_{Athmax}	$p_{R_C}(u)$	$p_{R_L}(u)$	$p_{RA}(u)$	$p_S(u)$
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

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

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

5.7. 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** que trará a análise destes resultados.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

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.

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.

6.1. 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 ($p_{R_L}(u)=1$).

Por outro lado, especificamente para a entidade Aeroporto de Guarulhos, esta espera não é rejeitável com base na rejeitabilidade para este aeroporto ($p_{R_A}(u)=0$), 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 ($p_{R_L}(u)=0,552$), além disto, existe a rejeição do Aeroporto de Congonhas ($p_{R_A}(u)=0,740$) 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. A 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. 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.

6.3. 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.

6.3. 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. 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.

7.3. 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 corroboram 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 com publicação em periódico Qualis A1 Engenharias IV, conforme descrito a seguir:

- *Satisficing Game Approach to Collaborative Decision Making Including Airport Management*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Print), v. PP, p. 1-10, 2016. (Almeida *et al.*, 2016).

Este trabalho também 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, Weingang e 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 (Almeida e Weingang, 2014).

- *Jogos Satisficing para Tomada de Decisão Colaborativa em Aeroporto*, XIII Simpósio de Pesquisa em Transporte Aéreo (SITRAER XIII), São Paulo, 2014 (Almeida e Weigang, 2014).
- *Abordagens em Teoria dos Jogos Satisficing para Balanceamento Fluxo Aéreo*, XI Simpósio de Pesquisa em Transporte Aéreo (SITRAER XI), Brasília, 2012 (Almeida e Weigang, 2012).

7.4. 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.R.F. (2010) “Análise de Múltiplos Algoritmos Aplicados em Balanceamento de Fluxo em Rede”. *Dissertação de Mestrado*. UnB. Disponível em: http://monografias.cic.unb.br/dspace/bitstream/123456789/270/1/DISSERTACAO_CICEROALMEIDA_versao_final.pdf. Acesso em: 12/05/2012.
- Almeida, C.R.F. e 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.R.F. e Weigang, L. (2014). “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.
- Almeida, C.R.F. e Weigang, L. (2014). “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.
- Almeida, C.R.F., Weigang, L. e Meinerz, G.V. “Satisficing collaborative decision making and controlling for airport management” (2014). In: *The 10th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems - MESA2014*.
- Almeida, C.R.F., Weigang, L., Meinerz G.V e Leihong, L (2016). “Satisficing Game Approach to Collaborative Decision Making Including Airport Management”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (Print)*, v. PP, p. 1-10.

- Archibald, J. K., Hill, J. C., Jepsen, N.A.; Stirling, W. C. e Frost, R. L. (2008). “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..
- Arruda Jr., A. C., Weigang, L. e Nogueira, K. B. (2014). “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.
- Axelrod, R. M (1984). *The evolution of cooperation*. New York: Basic Books.
- Bandeira, M. C. G. S. P., Correia, A. R. (2008). “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.
- Bertsimas, D. e Gupta, S. (2009). “Fairness in air traffic flow management”. *INFORMS Annual Meeting*.
- Bornholdt, S. e Schuster, H. G. (2003). (Ed.). *Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- Brasil (2014). “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. (2009). “ICA 100-12 - Tráfego Aéreo - Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo”.
- Brasil. (2013). “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/CGNA17-10.pdf>. Acesso em: 07/11/2013.
- Brasil. (2014). “Serviço de informações aeronáuticas”. Agosto 2014. Disponível em: <http://www.aisweb.aer.mil.br>. Acesso em: 01/08/2014.
- Cournot, A. A. (1987). “Researches into the Mathematical Principles of the Theory of Wealth”. New York, A. M. Kelley.
- Cruciol, L. L., Arruda Jr., A. C., Weigang, L., Li, L., Crespo, A. M. (2013). “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.
- Fraga, R. (2009). “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.

- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R. e Vlissides, J. (1994). *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 2. ed. [S.l.]: Addison-Wesley.
- INFRAERO. (2014a). “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-aeroporto.html>. Acesso em: 01/08/2014.
- INFRAERO (2014b). 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.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P. e Sturrock, D. T. (2004). “Simulation with Arena”. New York: McGraw-Hill, 2004.
- Luce, R. D. e Raiffa, H. (1957). *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey*. New York:, 1957.
- Myerson, R. B. (1991). “Game Theory: Analysis of Conflict”. 1991. p. 1. Chapter-preview links, pp. vii-xi. p.
- Nash, J. F. (1950a). “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. (1950b). “Non-Cooperative Games”. *Tese (Doutorado)* - Princeton University, 1950.
- Neumann, J. V.; Morgenstern, O. (1944). “The Theory of Games and Economic Behavior”. Princeton University Press, 1944.
- Norin, A. (2008). “Airport Logistics : Modeling and Optimizing the Turn-Around Process”. Linköping University Electronic Press, 2008. 87 p. (Linköping Studies in Science and Technology. Thesis, 1388).
- Ribeiro, V. F. (2013). “Decisão colaborativa com utilização de Teoria dos Jogos para o sequenciamento de partidas em aeroportos”. *Dissertação (Mestrado)*. Universidade de Brasília, 2013.
- Ribeiro, V. F. e Weigang, L. (2013). “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*. 2013.
- Simon, H. A. (1959). “Theories of decision-making in economics and behavioral science”. *The American Economic Review*, v. 49, p. 253–283, jun. 1959.
- Sotomayor, M. e Bugarin, M. S. “Lições de Teoria dos Jogos”. São Paulo: [s.n.], 2007.
- Souza, B. B., Weigang, L., Crespo, A. M. F. e Celestino, V. R. R. (2008). “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. e Celestino., V. R. R. (2009). “Balance modelling and implementation of flow balance for application in air traffic management”. *Computational Models, Software Engineering, and Advanced Technologies in Air Transportation: Next Generation Applications*. IGI Global, p. 38–56, 2009.
- Stirling, W. C. (2003). “Satisficing Games and Decision Making”. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003.
- Tonelli, P. A. (2006). “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. (2012). “A collision avoidance method based on satisficing game theory”. *2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2012.

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: Rejeitability(ρ , $u \in U$)

```

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       $p_R(u) \leftarrow \text{RejectC}(u \in U)$ 

```

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   $p_{R_C}(u) \leftarrow 0$ 
2  if  $u = \text{"ahp"}$  then
3       $p_{R_L}(u) \leftarrow p_{RD_L}(u)$ 
4  else if  $u = \text{"gdp"}$  then
5       $p_{R_L}(u) \leftarrow \max(p_{RD_L}(u), p_{RF_L}(u))$ 

```

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   $p_{R_L}(u) \leftarrow 0$ 
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  $u = \text{"ahp"}$  then
2      return  $p_{R_A}(u)$ 
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  $u = "gdp"$  then
3       $p_S(u) \leftarrow \text{SelectGDP}(u \in U)$ 
4  else if  $u = "ahp"$  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 E 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: Submódulo *EntitiesPreferenceSM*; Submódulo *SatisficingSM*; Submódulo *DecisionSupportSM*; Submódulo *DataPersistenceSM*.

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.

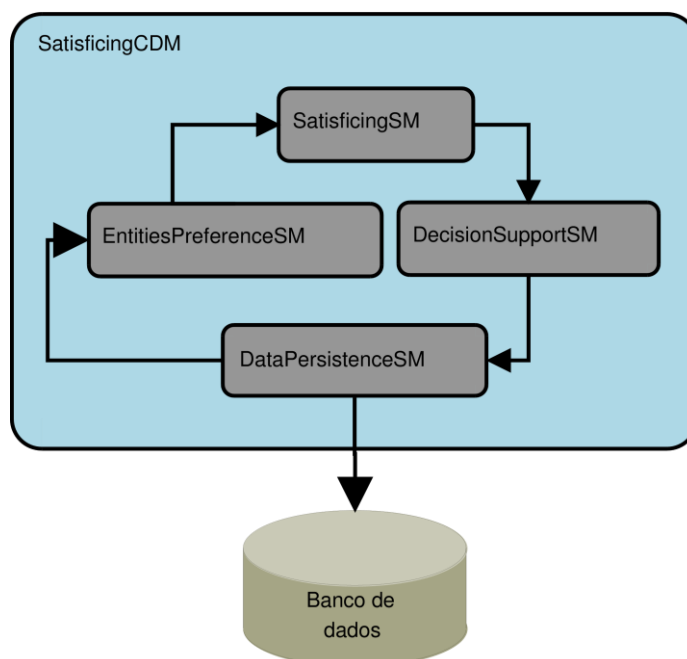


Figura B.1 – Arquitetura do Protótipo *SatisficingCDM*

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.

ANEXO C. CARTAS DE ESTACIONAMENTO DE AERÓDROMO DE GUARÚLHOS

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).

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 Aeronáuticas](#) do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (Brasil, 2014).