



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Matching Estável para Tomada de Decisão
Colaborativa na Alocação de Slots**

Antonio Carlos de Arruda Junior

Tese apresentada como requisito parcial
para conclusão do curso de Doutorado em Informática

Orientador
Prof. Dr. Li Weigang

Brasília
2015

Universidade de Brasília — UnB
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Doutorado em Informática

Coordenadora: Prof.^a Dr.^a Alba Cristina Magalhães Alves de Melo

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Li Weigang (Orientador) — CIC/UnB
Prof.^a Dr.^a Alba Cristina Magalhães Alves de Melo — CIC/UnB
Prof. Dr. Vander Ramos Alves — CIC/UnB
Prof.^a Dr.^a Yaeko Yamashita — ENC/UnB
Prof. Dr. Yuan Jin Yun — MAT/UFPR

CIP — Catalogação Internacional na Publicação

Arruda Junior, Antonio Carlos de.

Matching Estável para Tomada de Decisão Colaborativa na Alocação de Slots / Antonio Carlos de Arruda Junior. Brasília : UnB, 2015.

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

Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

1. Problema de Alocação de Slots, 2. Programa de Espera em Solo, 3. Sistema Inteligente, 4. Teoria de Matching, 5. Tomada de Decisão Colaborativa

CDU 004.4


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

Antônio Carlos de Arruda Junior


Matching Estável para Tomada de Decisão Colaborativa na Alocação de Slots

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-graduação em Informática da Universidade de Brasília, pela Comissão formada pelos professores:

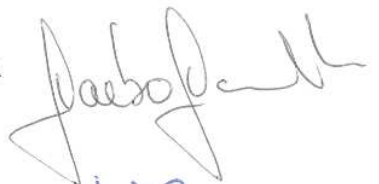
Orientador:


Prof. Dr. Li Weigang
(CIC/UnB)


Prof. Dr. Alba Cristina Magalhães A. de Melo
(CIC/UnB)


Prof. Dr. Vander Ramos Alves
(CIC/UnB)

Prof. Dr. Yaeko Yamashita
(ENC/UnB)



Prof. Dr. Yuan Jin Yun
(UFPR)



Vista e permitida a impressão.
Brasília, 29 de abril de 2015

Prof.^a Dr.^a Alba Cristina Magalhães Alves de Melo
Programa de Pós-Graduação em Informática
Departamento de Ciência da Computação
Universidade de Brasília

Dedicatória

*Este trabalho é dedicado à toda minha família, em especial
à minha esposa Angélica e meu filho Daniel.
Sem seu amor, apoio e compreensão,
não seria possível vencer
mais esse desafio.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à Deus, pela saúde e disposição para concluir este trabalho.

Aos amigos de longa data, Alessandro, Cícero, Leonardo e Vitor, meu muito obrigado pela ajuda na conquista dos créditos das matérias necessárias, através de muitas aulas, listas de exercícios, apresentações, implementações e avaliações. O trabalho em equipe realmente fez a diferença!

Aos amigos Crespo, Kamila, Márcio e Viorel, agradeço pelo apoio nas diversas publicações, com pesquisas, traduções, questionamentos e extensas revisões, entre muitas outras atividades, pois com esforço e dedicação, publicamos em 100% das submissões.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Li Weigang, pelos ensinamentos nesses quatro anos de curso. À todos os funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Informática (PPGInf), obrigado por toda a ajuda durante os anos em que estive estudando na UnB. Obrigado também ao Dr. Daniel O. Cajueiro e ao Dr. Maurício S. Bugarin, professores do programa de Pós-Graduação da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade (FACE), por nos permitirem participar dos cursos de Teoria dos Jogos.

Agradeço também, pelo inestimável apoio, aos amigos Zico e Francione, Douglas e Núbia, Rubens e Adalva. Vocês me ajudaram a chegar até aqui.

Pelo convite e auxílio na estadia em Paris, agradeço ao amigo Alessandro (novamente), sua esposa Marcilene e à pequena Alice. Através de sua hospitalidade, estar na França foi como estar no Brasil. Um agradecimento especial ao professor Dr. Félix M. Camino e sua família, pela recepção de boas-vindas em Toulouse, no período de estágio na École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC). Merci beaucoup!

Agradeço aos colegas do Banco do Brasil que apoiam o aprimoramento pessoal, acadêmico e profissional, por permitir minha participação nas atividades obrigatórias do curso de Doutorado, através da flexibilização dos horários de trabalho.

E finalmente, agradeço aos profissionais da área de Transporte Aéreo, em especial aos colegas do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), do Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA) e da Torre de Controle do Aeroporto Internacional de Brasília, por permitirem visitas em suas instalações, entrevistas com os gerentes de tráfego, e a concessão de dados para avaliações e testes na pesquisa.

Viva como se fosse morrer amanhã. Aprenda como se fosse viver para sempre.

– Mahatma Gandhi

Resumo

A tomada de decisão colaborativa (CDM) é um paradigma importante no processo de gerenciamento de tráfego aéreo (ATM). De acordo com a sua filosofia, a troca de informações entre os diversos intervenientes resultam em melhores decisões para o ATM. A construção dos algoritmos de alocação de *slots* utilizados nos programas de espera em solo (GDP) com CDM não contempla os principais *stakeholders* atuais no processo de tomada de decisão. Somando-se a esse fato, algumas deficiências no GDP têm sido relatadas em diversas pesquisas ao longo dos anos. Um desses problemas é que o algoritmo *Compression* nem sempre calcula resultados estáveis na alocação de recursos aeroportuários.

Esta situação limita o desempenho do ATM e pode gerar insatisfação entre os *stakeholders* que são afetados. Para resolver os problemas citados, o presente trabalho propõe uma nova solução para o problema de alocação de *slots* tratado pelo algoritmo *Compression*. Esse modelo, denominado DA-SLOT, possibilita o tratamento dos *stakeholders* já existentes na CDM, bem como, a inclusão de um novo participante, o gestor do aeroporto.

O modelo proposto utiliza a teoria de *matching* para criar um mercado de *slots*, onde as companhias aéreas e o gestor do aeroporto são jogadores que possuem preferências estratégicas no processo de alocação. O novo algoritmo utilizado nesse processo é baseado no mecanismo *Deferred Acceptance* (DA) para mercados de *matching* de dois lados.

Os estudos de caso utilizados na validação do modelo empregaram movimentos aéreos do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (SBCF) do ano de 2014, extraídos do site on-line da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO). A análise realizada sobre cenários hipotéticos e reais indica que o modelo DA-SLOT permite adequado tratamento das preferências de todos os jogadores do mercado através de uma alocação ótima. Além disso, características desejáveis inerentes ao mecanismo DA, como estabilidade nas alocações e controle de manipulação dos resultados, podem levar os jogadores a buscarem resultados ótimos globais no sistema. Estes resultados podem ser considerados como as principais contribuições científicas e sociais da pesquisa.

Palavras-chave: Problema de Alocação de Slots, Programa de Espera em Solo, Sistema Inteligente, Teoria de Matching, Tomada de Decisão Colaborativa

Abstract

Collaborative Decision Making (CDM) is an important paradigm in the process of Air Traffic Management (ATM). According to this paradigm, the exchange of information among the different entities result in the improved decisions for ATM. However, the construction of the slot allocation algorithms used in the Ground Delay Program (GDP) with CDM, does not address the current major stakeholders in the decision-making process. At the same time, some shortcomings in GDP have been reported in several studies over the last years. One of these problems is that the Compression algorithm in CDM not always calculates the stable results in the allocation of resources related to airport.

These limits of the ATM performance can generate the dissatisfaction among the stakeholders. To solve these problems, this PhD thesis proposes a new solution for the slot allocation problem addressed in the Compression algorithm. This model, called DA-SLOT enables the treatment of existing stakeholders in the CDM, as well as the inclusion of a new participant, the airport management services.

The proposed model uses the matching theory to create a market slots where the airlines and the airport managers are the players. These stakeholders in CDM have their strategic preferences in the allocation process. The new algorithm has been developed based on the Deferred Acceptance (DA) mechanism for two-sided matching markets.

The case studies are conducted for evaluation the developed model with the real data from Tancredo Neves International Airport (SBCF) of 2014. All the scenarios and data have taken from the official website of the Brazilian Airport Infrastructure Company (INFRAERO). The analysis on hypothetical and actual scenarios indicates that DA-SLOT model allows the correct treatment of the preferences of all players in the market through a stable allocation. In addition, desirable characteristics inherited from the DA mechanism, such as stability in the allocation and control manipulation of the results, may lead stakeholders to get overall performances in the system. These results can be considered as the main scientific and social contributions of this research.

Keywords: Slot Allocation Problem, Ground Delay Program, Intelligent System, Matching Theory, Collaborative Decision Making

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação e Justificativa	2
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia da Pesquisa	6
1.4	Organização da Tese	8
2	Fundamentação Teórica	10
2.1	Teoria dos Jogos para Mercados de <i>Matching</i>	10
2.2	Modelos Básicos de <i>Matching</i>	11
2.2.1	1950 - <i>Matching</i> Clássico	11
2.2.2	1962 - <i>Matching</i> para Mercados de Dois Lados	12
2.2.3	1974 - <i>Matching</i> para Mercados de Um Lado	13
2.3	O Problema do Casamento Estável	13
2.3.1	Algoritmo <i>Deferred Acceptance</i>	15
2.3.2	Algoritmo Confirma Estabilidade em <i>Matchings</i>	16
2.3.3	Exemplo de Aplicação - DA	17
2.4	Resumo do Capítulo	19
3	Alocação de Slots no ATM	20
3.1	Gerenciamento de Tráfego Aéreo	20
3.2	Tomada de Decisão Colaborativa (CDM)	21
3.2.1	Airport CDM (A-CDM)	22
3.2.2	Surface CDM (S-CDM)	23
3.3	Programas de Espera em Solo no ATM	25
3.4	Modelos e Algoritmos Básicos do CDM	25
3.4.1	Modelo Grover Jack	26
3.4.2	Modelo Clássico CDM	27
3.4.3	Algoritmo <i>Compression</i>	30
3.5	Problemática no Processo de Alocação de <i>Slots</i>	33

3.6	Resumo do Capítulo	33
4	Estado da Arte e Soluções para CDM	35
4.1	Soluções em Inteligência Artificial	35
4.1.1	Abordagem em Programação Inteira para GDP	36
4.1.2	Abordagem em Programação Inteira baseado em CDM	36
4.1.3	Abordagem em Sistemas Multiagentes baseada em Aeroportos . . .	37
4.1.4	Abordagem em Sistemas Multiagentes baseado em Fixos	39
4.1.5	Abordagem em Sistemas Multiagentes baseada em Aeronaves	40
4.1.6	Abordagem em Airport CDM	41
4.2	Pesquisas e Aplicação em Teoria de <i>Matching</i>	42
4.2.1	Modelo TTC-Balakrishnan	43
4.2.2	Modelo TTC-Schummer-Vohra	45
4.3	A Teoria dos Jogos e o CDM no Brasil	46
4.4	Resumo do Capítulo	47
5	Modelo de Mercado de <i>Slots</i>	50
5.1	Visão Geral	50
5.2	Jogadores	52
5.3	Modelagem do Mercado de <i>Slots</i>	53
5.4	Resumo do Capítulo	55
6	Arquitetura e Implementação	56
6.1	Ambiente	56
6.2	Entidades	57
6.3	Entrada e Saída de Informações	59
6.4	Objetivos e Ações	60
6.5	Módulos de Alocação	61
6.5.1	Sequência de Execução	61
6.5.2	Módulo de Definição de Cronograma	62
6.5.3	Módulo de Atualização de Parâmetros	62
6.5.4	Módulo de Alocação de <i>Slots</i>	62
6.6	Estruturas de <i>Payoff</i>	63
6.7	Processo de Alocação	65
6.7.1	Algoritmo de Pré-processamento	65
6.7.2	Algoritmo de Alocação	67
6.7.3	Algoritmo de Otimização	68
6.8	Resumo do Capítulo	70

7	Estudo de Caso	71
7.1	Descrição do Cenário e Planejamento dos Casos	71
7.2	Cenário 1 – DA-SLOT <i>versus Compression</i>	73
7.3	Cenário 2 – DA-SLOT com <i>Payoff</i> Simplificado	77
7.4	Cenário 3 – DA-SLOT com <i>Payoff</i> Completo	82
7.5	Resumo do Capítulo	89
8	Análise dos Resultados	91
8.1	Validação do Modelo	91
8.2	Estabilidade do Modelo	93
8.2.1	Prova de Estabilidade	93
8.3	Manipulação de Resultados	93
8.3.1	Estabilidade Ótima para Proponentes	94
8.3.2	Estrutura à Prova de Estratégia	95
8.4	Resultados Ótimos	96
8.5	Comparação DA-SLOT versus CDM Clássico	97
8.6	Resumo do Capítulo	97
9	Conclusão	99
9.1	Visão Geral	99
9.2	Contribuições	100
9.3	Validade e Limitações do Modelo	101
9.4	Desafios Encontrados	102
9.5	Perspectivas e Trabalhos Futuros	103
9.6	Considerações Finais	104
	Referências	106
A	Artigos Publicados	112
A.1	Artigos completos publicados em periódicos	112
A.2	Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)	113
A.3	Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo expandido)	114

Lista de Figuras

3.1	Visão geral do A-CDM. Fonte original em inglês: (EUROCONTROL, 2012)	23
3.2	A arquitetura Grover Jack. Fonte: adaptado de Vossen e Ball (2006a).	26
3.3	A arquitetura CDM clássica. Fonte: adaptado de (Vossen e Ball, 2006a)	27
3.4	O algoritmo RBS. Fonte original em inglês: (Butler, 1998)	28
4.1	Arquitetura dos agentes no ATFMS-MAS. Fonte: Dib. <i>et al.</i> (2007)	38
4.2	Arquitetura dos agentes TMU e AOC. Fonte: Wolfe <i>et al.</i> (2009)	41
4.3	Objetivos e desafios dos principais intervenientes do CDM. Fonte original em inglês: Norin (2008)	42
5.1	DA-SLOT – Mercado de <i>slots</i>	51
6.1	Integração dos diversos intervenientes do DA-SLOT	58
7.1	Processo de Alocação do modelo DA-SLOT (terceira fase)	71
8.1	Mercado de Casamentos x Mercado de <i>Slots</i> .	96

Lista de Tabelas

2.1	Lista de preferências para homens e mulheres no algoritmo DA (Nisan, 2007)	18
4.1	Tabela de trabalhos publicados em CDM	48
7.1	Características do Modelo CDM Clássico	72
7.2	Cenário Inicial: voos previstos	74
7.3	Cenário Inicial: preferências	74
7.4	Comparação CDM Clássico x DA-SLOT (fim do ciclo 1)	75
7.5	Comparação CDM Clássico x DA-SLOT (fim do ciclo 2)	76
7.6	Comparação CDM Clássico x DA-SLOT (resultado final)	77
7.7	Cronograma original de <i>slots</i> e Cronograma RBS	78
7.8	Movimentos aéreos de chegada (AAR = 6 aeronaves / hora)	78
7.9	Listas de Preferências dos voos $f \in F$. Regra de Schummer e Rakesh (2013)	79
7.10	Cálculo de $D_S(f)$ – Equação (6.2)	80
7.11	Cálculo de $R_S(f)$ – Equação (6.3)	80
7.12	Listas de Preferências dos <i>slots</i> – Equação (6.3)	80
7.13	Listas de Preferências dos <i>slots</i> – Equação (6.3)	81
7.14	Processamento do DA-SLOT	82
7.15	Movimentos aéreos de chegada de SBCF (Infraero, 2014)	83
7.16	Resultados na aplicação da Equação (6.1) nos dados de movimentos aéreos	84
7.17	Lista de Preferências dos voos F	84
7.18	Cronograma original e cronograma novo para cada <i>slot</i>	85
7.19	Resultados na aplicação da Equação (6.2) e da Equação (6.3) sobre os dados de movimentos aéreos	86
7.20	Lista de preferências dos <i>slots</i> \succ_S	86
7.21	Conjuntos de preferências dos voos (\succ_F), preferências dos <i>slots</i> (\succ_S), e os proprietários originais dos <i>slots</i> (O)	88
7.22	Processamento do DA-SLOT	89
8.1	Comparação do DA-SLOT e CDM Clássico	98

Lista de Abreviaturas e Siglas

- AAR** Taxa de Chegada do Aeroporto (*Airport Arrival Rate*)
- A-CDM** Tomada de Decisão Colaborativa em Aeroportos (*Airport Collaborative Decision Making*)
- ADR** Taxa de Saída do Aeroporto (*Airport Departure Rate*)
- AHP** Problema de Espera no Ar (*Airborne Holding Problem*)
- AMAN** Gerenciamento de Chegadas (*Arrival Management*)
- ANAC** Agência Nacional de Aviação Civil
- AOO** Centro de Operações das Companhias Aéreas (*Airline Operations Center*)
- APP** Centro de Controle de Aproximação (*Approach Control Center*)
- ASM** Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management*)
- ATC** Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control*)
- ATFM** Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*)
- ATM** Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*)
- ATS** Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Service*)
- CATFM** ATFM Colaborativo (*Collaborative Air Traffic Flow Management*)
- CBR** Raciocínio Baseado em Casos (*Case-Based Reasoning*)
- CDM** Tomada de Decisão Colaborativa (*Collaborative Decision Making*)
- CGNA** Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea
- CTA** Horário de Chegada Controlado (*Controlled Time of Arrival*)
- DA** *Deferred Acceptance*

DA-SLOT *Deferred Acceptance Slot*

DBC Balanceamento entre Capacidade e Demanda (*Demand and Capacity Balancing*)

DECEA Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DMAN Gerenciamento de Partidas (*Departure Manager*)

ETA Horário Estimados de Chegada (*Estimated Time of Arrival*)

FAA *Federal Aviation Administration*

GDP Programa de Espera em Solo (*Ground Delay Program*)

GHP Problema de Espera em Solo (*Ground Holding Problem*)

ICAO Organização de Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization*)

INFRAERO Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária

MAP Módulo de Atualização de Parâmetros

MAS Módulo de Alocação de *Slots*

MDC Módulo de Definição de Cronograma

RBS *Ration-By-Schedule*

STVD Sistema de Tratamento e Visualização de Dados

SYNCRONMAX Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo

TTC *Top Trading Cycles*

VCG *Vickrey-Clarke-Groves*

Capítulo 1

Introdução

A demanda por transporte aéreo tem aumentado a complexidade do gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo (ATM) (Ball *et al.*, 2010), trazendo novos desafios para os gestores do sistema de tráfego aéreo (Norin, 2008). O congestionamento dos aeroportos e do espaço aéreo são alguns desses desafios (Ball *et al.*, 2010; Tumer e Agogino, 2008; Wolfe *et al.*, 2009). Como resultado, medidas de restrição de fluxo de tráfego aéreo são usualmente utilizadas. Dentre essas medidas, a restrição em solo (*Ground Delay Program* – GDP) é uma das mais implementadas pelos responsáveis do fluxo de tráfego aéreo (Butler, 1998; Hoffman, 1997; Vossen e Ball, 2006a).

A medida de restrição de espera em solo consiste em redistribuir os tempos de utilização das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos, denominadas *slots*. Isso resulta na criação de um novo cronograma de partida e de chegada dos voos, levando ao atraso dos voos afetados (Vossen e Ball, 2006a).

O gerenciamento desses atrasos é baseado em processos formados através da filosofia da tomada de decisão colaborativa (*Collaborative Decision Making* – CDM). O CDM é um paradigma que tem como objetivo a melhoria dos processos existentes através da integração e troca de dados entre os participantes do sistema ATM. Os participantes compreendem: as unidades de controle de tráfego aéreo (*Air Traffic Control* – ATC), os agentes de regulação do setor, as companhias aéreas, e as concessionárias de gestão de aeroportos.

A implementação da medida de restrição de espera em solo com o CDM pode resultar em problemas durante a realocação dos voos (Butler, 1998; Hoffman, 1997). Um dos problemas está na ausência de incentivos às companhias aéreas para que informem sobre o cancelamento de seus voos em tempo hábil (Schummer e Rakesh, 2013). Isso faz com que os *slots* permaneçam ociosos. Além disso, a distribuição dos *slots* é realizada utilizando o algoritmo *Compression* (Hoffman, 1997), o qual conforme demonstrado por Schummer e Rakesh (2013), pode levar à alocações não estáveis.

Apesar de alguns dos problemas de gerenciamento do tráfego aéreo terem sido abordados na literatura (Balakrishnan, 2007; Ball *et al.*, 2003; Butler, 1998; Hoffman, 1997; Schummer e Rakesh, 2013; Vossen e Ball, 2006b; Wolfe *et al.*, 2009), a maioria concentra-se no tratamento das deficiências do problema de alocação de *slots* sob a ótica do modelo CDM clássico. Logo, a entrada de novos *stakeholders* no processo GDP ainda é um problema a ser resolvido, segundo o paradigma da tomada de decisão colaborativa.

Diante do exposto, essa Tese propõe um novo modelo para o processo de alocação de *slots* que permite a entrada de mais um participante, bem como, utiliza um algoritmo que sempre computa um resultado ótimo¹ para todos os participantes.

A solução proposta, chamada DA-SLOT, foi modelada através da teoria de mercados de *matching* da teoria dos jogos. O mecanismo de alocação de recursos utiliza uma adaptação do algoritmo chamado *Deferred Acceptance* (DA) para mercados de *matching* de dois lados (*two-sided matching markets*) (Gale e Shapley, 1962).

Essa abordagem, ainda inédita na solução do problema de alocação de *slots*, permite a modelagem de um novo processo capaz de realizar o tratamento de preferências estratégicas envolvendo não só companhias aéreas e as unidades de controle de tráfego aéreo (ATC) do país, mas também o gestor do aeroporto.

1.1 Motivação e Justificativa

A alocação de recursos escassos em ambientes críticos e competitivos é considerada uma tarefa complexa, onde o cenário é fator determinante para o modelo utilizado (Roth e Peranson, 1999; Tumer e Agogino, 2008).

Quando esses cenários apresentam restrições de domínio, que possam apresentar riscos à segurança, a atividade de projetar algoritmos corretos, com resultados considerados ótimos, é de fundamental importância ao sucesso da implementação do modelo de alocação (Roth *et al.*, 2004; Sönmez e Ünver, 2011).

Essa criticidade de implementação pode ser evidenciada em processos de gerenciamento do transporte aéreo, onde a eficiência e a segurança nos processos podem ter grande impacto sobre passageiros, aeroportos, companhias aéreas e tripulação (Norin, 2008).

Segundo Crespo *et al.* (2012), dentre as diversas tarefas do ATM, o modelo clássico de alocação de *slots* em programas de espera em solo é um dos mais importantes, visto que trata dos atrasos aplicados às aeronaves em momentos críticos. A versão clássica desse modelo foi implementada através dos algoritmos conhecidos como *Ration-By-Schedule* (Vossen

¹Neste trabalho, o termo resultado *ótimo* é utilizado como sinônimo de uma alocação *estável*. Em complemento a isso, na Seção 8.4, resultados ótimos serão associados à alocações *estáveis* e à *prova de estratégia*.

e Ball, 2006a) e *Compression* (Hoffman, 1997) onde ambos são responsáveis por tratar aeronaves em solo afetadas pela política de espera em solo.

Esse modelo de alocação, que será chamado nesta Tese de *CDM clássico*, é considerado bem sucedido junto às companhias aéreas e implementado nos principais aeroportos do mundo. Apesar disso, ele possui reconhecidas deficiências abordadas por diversos trabalhos nos últimos anos (Ball *et al.*, 2010; Butler, 1998; Schummer e Rakesh, 2013). Uma análise do processo GDP nos remete à dois problemas fundamentais:

- a tomada de decisão não contempla um importante interveniente que afeta diretamente o resultado do processo; e
- o algoritmo *Compression*, utilizado no processo de alocações de *slots*, não garante um resultado *ótimo*.

Portanto, o que motivou a abordagem de tema desta Tese é a solução de tais problemas, dentro de um contexto relevante tanto para o gerenciamento de tráfego aéreo quanto para a teoria dos jogos.

A adição do novo *stakeholder* está vinculada ao cenário aéreo brasileiro e mundial. No Brasil, a busca pela otimização na gestão do ATM e melhoria na qualidade dos serviços prestados à população, levaram o governo a realizar uma parceria com a iniciativa privada na administração compartilhada dos principais aeroportos brasileiros (INFRAERO, 2013). A evolução do cenário aéreo com a entrada desse novo *stakeholder* possui um impacto significativo que pode ser descrito junto aos objetivos diversos, e muitas vezes contraditórios, que empresas privadas têm em relação aos órgãos públicos (DECEA, 2013). Além disso, os processos aeroportuários têm reconhecido impacto sobre o processo de gerenciamento de fluxo, uma vez que os voos normalmente iniciam e terminam em aeroportos. Logo, apesar do principal objetivo comum entre todos os intervenientes ser a segurança, os objetivos específicos à cada um podem levar à conflitos no sistema aéreo como um todo (Tumer e Agogino, 2008).

A relevância desse trabalho está na abordagem de uma solução para o problema de alocação de *slots* no CDM, com reflexo direto para o cenário brasileiro. A modelagem do processo de alocação de *slots*, que trate de todos os intervenientes importantes, é de extrema importância para o bom funcionamento do sistema aéreo brasileiro e mundial.

É importante salientar que o desenvolvimento de uma solução para os problemas apontados não é trivial. Basicamente os participantes desse cenário no mundo real possuem interesses particulares e distintos, que envolvem resultados financeiros e de eficiência operacional (Cruciol *et al.*, 2013). Qualquer modelo de alocação precisa contemplar, além desse aspectos, os requisitos fundamentais como segurança e fluência de tráfego não sejam prejudicados (Arruda Jr *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a teoria dos jogos aplicada à mercados de *matching* (Gale e Shapley, 1962) apresenta alguns mecanismos relevantes para a solução de cenários semelhantes (Abdulkadiroğlu e Sönmez, 1999; Ergin e Sönmez, 2006; Roth e Peranson, 1999; Sönmez e Ünver, 2011). E apesar de não ter sido utilizada anteriormente para o tratamento específico dos problemas apresentados, seus algoritmos de alocação existentes possuem propriedades desejáveis e matematicamente provadas como estabilidade e equilíbrio dos resultados gerados (Gale e Shapley, 1962; Shapley e Scarf, 1974).

Portanto, pode-se concluir que a existência de algoritmos que nem sempre calculam resultados ótimos, e a ausência na previsão e correta integração entre todas as partes interessadas em alguns modelos atualmente em uso na área de transporte aéreo, são problemas de significativa relevância, visto a importância que essa atividade apresenta para a economia e para a sociedade como um todo (Arruda Jr *et al.*, 2014; Norin, 2008; Schummer e Rakesh, 2013; Vossen e Ball, 2006a; Wolfe *et al.*, 2009).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a definição de um novo modelo para a alocação de aeronaves à *slots* nos aeroportos, segundo a filosofia da tomada de decisão colaborativa. Esse modelo, chamado *DA-SLOT*, utiliza a teoria dos jogos aplicada à mercados de *matching* de dois lados para permitir a participação das companhias aéreas e do gestor do aeroporto no processo de tomada de decisão. A adaptação do mecanismo *Deferred Acceptance* no processo de alocação de *slots* permite ao modelo proposto computar uma alocação ótima para todos os jogadores desse mercado.

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser detalhados segundo aspectos de três áreas de interesse distintas: Ciência da Computação, Teoria dos Jogos e Transporte Aéreo.

Quanto à *Ciência da Computação*, este trabalho se propõe a:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica, estudando e analisando algoritmos de alocação quanto à sua aplicação no contexto do problema de sequenciamento de aeronaves em pistas de aeroportos;
- Analisar o funcionamento e características dos processos utilizados nos programas de espera em solo atuais, com maior ênfase no algoritmo *Compression*;
- Construir algoritmos adequados ao modelo proposto, que sejam capazes de trabalhar com funções de *payoff* e com restrições de tempo de atraso das aeronaves;
- Montar cenários de teste para realizar estudos de caso utilizando o modelo proposto;

- Analisar e comparar os resultados alcançados na aplicação do modelo *DA-SLOT*, validando seu funcionamento quanto aos dados de movimentos aéreos.

Quanto à área da *Teoria dos Jogos*, este trabalho se propõe a:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica, estudando o contexto histórico, funcionamento, características e aplicações da teoria dos jogos e mercados de *matching* em geral;
- Estudar e analisar as soluções já propostas que utilizam teoria de *matching* em problemas de alocação de *slots* e aeronaves;
- Modelar e formalizar um “mercado de *slots*”, bem como seus jogadores, com base na teoria de mercados de *matching* de dois lados;
- Definir funções de *payoff* que permitam a criação de listas de preferências para todos os jogadores do mercado;
- Analisar os resultados alcançados pelo modelo *DA-SLOT*, quanto às características desejáveis como alocações estáveis e à prova de estratégia.

Quanto à área de *Transportes Aéreos*, este trabalho se propõe a:

- Estudar e analisar, através de uma pesquisa bibliográfica, a estrutura do gerenciamento do tráfego aéreo, os principais órgãos de controle de tráfego, e os processos voltados ao gerenciamento de aeronaves em aeroportos durante um programa de espera em solo;
- Definir com embasamento bibliográfico, quais são as principais entidades *stakeholders* do cenário aéreo, presentes nos processos atuais da tomada de decisão colaborativa;
- Modelar essas entidades como elementos alocáveis ou tomadores de decisão nos processos do *DA-SLOT*, definindo os objetivos próprios de cada uma com base nos *stakeholders* reais;
- Obter dados reais de movimentos aéreos para a montagem dos cenários de teste utilizados nos estudos de caso;
- Analisar e comparar os resultados entre a abordagem *DA-SLOT* e a do CDM clássico, quanto as características inerentes à ambos os modelos e a obtenção de alocações ótimas entre aeronaves e *slots*.

O desenvolvimento desta Tese também possibilitou publicações à respeito das pesquisas realizadas e resultados alcançados em diversos congressos e revistas nacionais e internacionais listados no Apêndice A.

1.3 Metodologia da Pesquisa

Nesta seção serão expostos os aspectos metodológicos das técnicas de pesquisa e desenvolvimento adotadas neste trabalho. Segundo conceitos descritos por Gil (2008), este trabalho possui características de: (a) *pesquisa aplicada*, pois seus resultados dão embasamento para que o modelo aqui proposto possa ser utilizado em soluções CDM; (b) *pesquisa qualitativa*, pois serão realizadas análises dos resultados obtidos; e (c) *pesquisa descritiva*, pois serão descritas características positivas e negativas referentes ao modelo.

O processo de desenvolvimento desta pesquisa foi focado em sete etapas distintas, descritas a seguir.

Etapa 1 - Pesquisa bibliográfica

Nessa etapa foi realizado o levantamento da base teórica do trabalho, no qual foi considerado o estudo de livros, teses, relatórios técnicos e periódicos relacionados ao tema de pesquisa. Além destes documentos, também foram analisados artigos científicos e publicações em revistas especializadas das áreas de Ciência da Computação, Transporte e Economia.

A respeito das fontes consultadas, podemos citar as principais como: *Association for Computing Machinery* (ACM), *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), *Transportation Research Part C*, *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society* (JBTA), *Sociedade Brasileira de Pesquisa em Transporte Aéreo* (SBTA), *Simpósio de Transporte Aéreo (SITRAER)*, *Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (AN-PET), *Conference on Intelligent Transportation Systems*(ITS), *International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering* (SEKE).

Etapa 2 - Fundamentação Teórica

Os conceitos utilizados no desenvolvimento da solução proposta foram embasados em revisão bibliográfica referente à temas relacionados à algoritmos de alocação de recursos, complexidade, priorização de alocação, provas de estabilidade, sequenciamento de aeronaves em pistas de aeroportos, entidades do cenário e objetivos, entre outros. Além disso, também foram abordados assuntos referentes à teoria de jogos gerais, mercados de

matching, características de jogadores racionais, jogos baseados em múltiplos jogadores, modelagem formal de mercados e jogadores, e teoria dos jogos em problemas de ordenação.

Etapa 3 - Estado da Arte

Esta etapa buscou identificar trabalhos de autores relevantes na áreas de ciência da computação e teoria dos jogos aplicados ao gerenciamento do tráfego aéreo, quanto a originalidade e foco de aplicação das soluções propostas. Através do material coletado foi possível visualizar a evolução das pesquisas na área de transporte aéreo, bem como, identificar quais trabalhos atuais podem ser considerados estado da arte no programa de espera em solo.

Etapa 4 - Modelagem e Arquitetura da Proposta

Essa etapa é responsável pelas definições e construção do modelo DA-SLOT. Para a modelagem inicial foram identificados os principais *stakeholders* dos processos CDM e os jogadores que competem por recursos em um GDP. Após, foi realizada a formalização e modelagem de um *mercado de slots*, cenário onde ocorre a concorrência por recursos. Uma estrutura de pagamentos (*payoffs*), representada por funções utilidade, foi definida para os jogadores de cada um dos lados desse mercado. Além disso, são descritos os algoritmos responsáveis pelos resultados ótimos de alocação. Também são definidos os objetivos e integração entre as entidades tomadoras de decisão e os jogadores que disputam os recursos, bem como, as regras utilizadas em todas as etapas do processo.

Etapa 5 - Coleta de Dados e Estudos de Caso

Os dados utilizados na avaliação do modelo DA-SLOT são compostos por informações de demanda de fluxo de tráfego e movimentos de voos em períodos determinados. A coleta foi realizada através da Internet, em sites responsáveis por manter histórico de movimentos aéreos, como da Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC) e da INFRAERO. Estes dados foram utilizados para análise e validação do modelo proposto, através de simulações e estudos de caso para cenários de utilização de programas de espera em solo.

Etapa 6 - Análise de Avaliação dos Resultados

A etapa de avaliação e análise do modelo proposto foi realizada com base nos estudos de caso, onde é realizada a descrição da mecânica das etapas do processo de alocação, a execução dos algoritmos utilizados, uma comparação lado-à-lado entre o DA-SLOT e o CDM clássico, bem como, indicações das vantagens e desvantagens dessa proposta. Nessa

parte, todos as fundamentações e conceitos teóricos estabelecidos foram utilizados para a validação do modelo.

Etapa 7 - Elaboração da Tese

Escrever e sumarizar os resultados dessa pesquisa em um documento em forma de Tese, para documentação e defesa de todo o trabalho realizado, no curso de Doutorado em Informática a Universidade de Brasília (UnB). Para a realização do trabalho foram realizadas visitas ao Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), à Torre de Controle do Aeroporto Internacional de Brasília, e encontros frequentes com engenheiros e analistas de empresas responsáveis pelo desenvolvimento de ferramentas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo utilizadas no cenário nacional, através de convênios de pesquisa firmados com a Universidade de Brasília (UnB). O desenvolvimento desta Tese também possibilitou a publicação das pesquisas realizadas e resultados alcançados em diversos congressos e revistas nacionais e internacionais.

1.4 Organização da Tese

Esta Tese está organizado da seguinte forma.

O **Capítulo 1** apresenta a motivação e justificativa deste trabalho, objetivos gerais e específicos, a metodologia de pesquisa e modelagem utilizada, e uma breve descrição da estrutura deste documento.

A fundamentação teórica dos principais conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho é apresentada no **Capítulo 2**. Nesta parte são abordados brevemente a teoria dos jogos com ênfase em mercados de *matching*, modelos básicos de alocação de recursos, *matching* para mercados de um e de dois lados, o problema clássico do casamento estável, o algoritmo *Deferred Acceptance* utilizado na distribuição das alocações, um algoritmo para verificação de estabilidade no resultado calculado, e um exemplo de aplicação do mecanismo DA.

O **Capítulo 3** faz uma contextualização do problema de alocação de *slots* no gerenciamento de tráfego aéreo (ATM), uma breve explicação dos principais serviços prestados pelo ATM, e apresenta a histórica do paradigma da tomada de decisão colaborativa (CDM) com sua implementação na Europa, através do *Airport*(A-CDM), e nos Estados Unidos, com o *Surface* CDM (S-CDM). Também são detalhados os processos GDP, sua evolução através do modelo *Grover Jack*, e seus algoritmos básicos atualmente em uso, *Ration-by-Schedule* e *Compression*. Uma análise sobre as principais vantagens e deficiências do processo de alocação atual são mostradas no final do Capítulo.

O **Capítulo 4** resgata um resumo atual do estado da arte para CDM de forma geral, com o relato das principais pesquisas aplicadas em soluções para o gerenciamento de tráfego aéreo (ATM). Na área de Inteligência Artificial (IA) são abordados trabalhos baseados em programação inteira e em sistemas multiagentes, com foco em aeroportos, em fixos e em aeronaves. Quanto à pesquisas e aplicações em teoria de *matching*, são abordados as propostas relevantes nessa área, com especial ênfase em soluções que utilizam mercados de um lado, os modelos TTC-Balakrishnan e TTC-Schummer-Vohra, a saber. Em seguida, são apresentados alguns trabalhos que utilizam a teoria dos jogos para o CDM no Brasil. O resumo ao final do Capítulo apresenta uma tabela contendo alguns dos trabalhos mais relevantes, dando uma visão evolutiva das pesquisas na área no gerenciamento de tráfego aéreo (ATM).

No **Capítulo 5** é apresentada a modelagem da proposta deste trabalho, chamada DA-SLOT, que utiliza o mecanismo de *matching* para mercado de dois lados. Também são definidos os jogadores desse mercado, seus principais objetivos e as definições de características dos *elementos alocáveis* e dos *tomadores de decisão*, onde o *mercado de slots* é então formalizado.

O **Capítulo 6** detalha a arquitetura e implementação do modelo DA-SLOT, de forma onde são contextualizadas as entidades utilizadas, a obtenção e a troca de informações entre elas. Também é definida a estrutura das funções de *payoff* e os algoritmos de alocação criados especificamente para este mercado. Ao final são apresentadas as etapas de cálculo das preferências dos jogadores através das funções utilidade e os ciclos de execução dos algoritmos no processo de alocação de aeronaves e *slots*.

Os estudos de caso são apresentados no **Capítulo 7**. Aqui é realizada a descrição e origem dos dados utilizados nos cenários e o planejamento definido para os testes realizados. Utilizando-se exemplos de aplicação do programa de espera em solo (GDP) é verificado o funcionamento do modelo DA-SLOT através da comparação do processo de alocação do *DA-SLOT* versus o algoritmo *Compression*, bem como, sua execução utilizando-se dados reais de aeroportos.

No **Capítulo 8** é realizada a análise dos resultados dos estudos de casos. Aqui são tratadas questões importantes como validade do modelo proposto, propriedades desejáveis como estabilidade e impossibilidade de manipulação, complexidade dos algoritmos, e uma comparação qualitativa entre o modelo DA-SLOT e o modelo CDM clássico.

E, finalmente, uma visão geral de todo o trabalho é apresentada no **Capítulo 9**. São assuntos relevantes dessa conclusão o resumo dos resultados alcançados, as principais contribuições da proposta e as limitações do modelo proposto. Ao final do Capítulo são elencadas as dificuldades encontradas no desenvolvimento da pesquisa, e as possibilidades de extensão na forma de trabalho futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

A teoria dos jogos é utilizada como uma ferramenta matemática para a modelagem e análise de estratégias entre múltiplos jogadores em diversas áreas (Von Neumann e Morgenstern, 1944). Nos últimos anos ela têm sido aplicada com sucesso em trabalhos na área de transportes (Balakrishnan, 2007; Ball *et al.*, 2005; Ribeiro e Weigang, 2013; Schummer e Rakesh, 2013).

Um dos motivos do sucesso dessa teoria pode ser atribuído à diversidade de cenários teóricos e reais em que ela pode ser aplicada. Por exemplo, em estudos sobre o mercado de ações, dinâmica de leilões, dominância entre genes na evolução genética, situações de conflitos armados, resultados de eleições, entre outros (Ball *et al.*, 2005; Sönmez e Ünver, 2011).

Na Economia, a teoria dos jogos é utilizada para estudar as relações entre oferta e demanda de recursos nas sociedades. Entretanto, há várias décadas alguns teóricos da área de jogos a utilizam para analisar o comportamento de algoritmos de alocação, possibilitando a distribuição desses recursos entre os jogadores em cenários específicos (Roth *et al.*, 2004).

Nesta seção será dada uma visão geral sobre a teoria dos jogos aplicada à mercados de *matching*, e dos algoritmos e conceitos utilizados na sua aplicação.

2.1 Teoria dos Jogos para Mercados de *Matching*

Em ambientes onde o problema da concorrência por recursos limitados pode ser modelado como um mercado, a teoria de *matching* auxilia na busca por soluções ótimas para o problema.

A alocação de recursos limitados entre elementos de um sistema é um estudo aplicado à diversas áreas que vão desde serviços de Internet à utilização do espaço aéreo. A correta

definição das regras, análise e restrições de um cenário pode ser considerada fator de sucesso no mecanismo de distribuição desses elementos.

Nesse contexto, a teoria dos jogos apresenta alguns modelos de análise e tratamento de concorrência entre jogadores em ambientes competitivos (Nobel, 2012). Através desses modelos, mecanismos de alocação de recursos podem ser melhor estudados e avaliados de pontos de vista como eficiência, justiça e estabilidade nos resultados.

2.2 Modelos Básicos de *Matching*

Segundo Nobel (2012), podemos verificar que a teoria de *matching* tem como objetivos analisar, modelar e definir soluções para problemas de alocação de recursos, com base em modelos de mercados. Ela associa o termo sistema a um *mercado* caracterizado por recursos disponíveis que são negociados por jogadores específicos. Neste mercado, as *preferências* de cada jogador em relação aos recursos disponíveis são as estratégias que serão avaliadas pelo *mecanismo de alocação*.

Como exemplos de *mercados* podemos citar o mercado de trabalho, onde empresas ofertam vagas de emprego a trabalhadores, mercado de vagas acadêmicas que envolvem estudantes e universidades, mercado de pacientes que necessitam de transplante de órgãos, ou ainda, mercados de leilões, que podem ser vistos como casos especiais envolvendo um único vendedor, entre outros.

As *preferências* são formalizadas através de listas onde cada jogador informa suas prioridades sobre os recursos desejados, por ordem de importância. Por exemplo, em um mercado teórico de namoros, composto por um conjunto de homens e outro de mulheres, o jogador *Joao* pode preferir namorar com *Camila* em primeiro lugar, com *Aline* em segundo lugar, e com *Maria* em terceiro. Logo, sua lista de preferências é formada pelo conjunto $P = \{Camila, Aline, Maria\}$. É justo imaginar que todos os outros jogadores possuem preferências sobre os elementos do conjunto oposto.

Neste mercado, um *mecanismo de alocação* deve encontrar um resultado satisfatório alocando estes jogadores entre si, levando em conta as preferências de cada um. Um *matching*, neste contexto, representa o resultado final contendo a alocação ou troca de recursos entre todos os jogadores presentes no mercado (Sönmez e Ünver, 2011).

2.2.1 1950 - *Matching* Clássico

Nas décadas de 1950 e 1960 foram desenvolvidos os principais conceitos relacionados à teoria de mercados de *matching*. Esses conceitos se baseiam na ideia chave de que os

jogadores em um mercado são *racionais*², definindo suas preferências de acordo com seus interesses e agindo corretamente para atingir seus objetivos.

Caso nenhum jogador encontre uma forma de conseguir um resultado melhor do que o resultado proposto pelo processo de *matching*, dizemos que o resultado é *estável*.

A noção de estabilidade é um conceito central na teoria dos jogos cooperativos, uma área abstrata da Economia que procura determinar como qualquer conjunto de indivíduos racionais pode escolher uma alocação de forma cooperativa (Nisan, 2007). Na teoria de *matching* ela determina uma característica fundamental de qualquer mecanismo de alocação: o de fornecer resultados ótimos aos jogadores.

Antes mesmo de qualquer formalização teórica sobre as possíveis soluções, o processo *National Resident Matching Program* (NRMP) foi criado com sucesso para resolver o problema de alocação de médicos recém-formados à hospitais nos Estados Unidos (Roth e Sotomayor, 1989).

Recentemente, a teoria de *matching* pode ser considerada como um exemplo muito bem sucedido da aplicação da teoria dos jogos na teoria econômica. Os conceitos e soluções propostas para mercados do mundo real possibilitaram excelente retorno quanto ao bem estar social da sociedade (Nobel, 2012). Através dela, também foi possível a criação de outras áreas de estudo como teoria dos jogos algorítmica, *design* de mercados e *design* mecanismos (Nisan *et al.*, 2007; Roth e Sotomayor, 1989; Sönmez e Ünver, 2011).

2.2.2 1962 - *Matching* para Mercados de Dois Lados

Em 1962 um artigo apresentou provas matemáticas do conceito de estabilidade a um caso especial (Gale e Shapley, 1962), que ficou conhecido como o problema do casamento estável (*Stable Marriage Problem*).

Este problema pode ser caracterizado como um “mercado de casamentos” onde existem dois conjuntos disjuntos, isto é, que não possuem elementos em comum, representando um grupo de homens solteiros e outro grupo de mulheres solteiras, que desejam se casar, respeitando-se as preferências de cada um. Como ambos os conjuntos de jogadores, homens e mulheres, possuem preferências, esse problema de alocação ficou conhecido como mercado de *matching* de dois lados (*two-sided matching market*).

O objetivo na solução deste mercado é conseguir associar cada homem a cada mulher, através de um relacionamento “um-para-um”, de forma que todos os pares fiquem satisfeitos. O resultado contendo as alocações entre cada elemento é chamado de *matching*. Nesta situação, cada homem deve classificar as mulheres do outro conjunto segundo uma ordem estrita de preferência, e as mulheres devem fazer o mesmo quanto aos homens.

²Para um jogador ser considerado *racional*, o conjunto de suas preferências deve ser *completo* e *transitivo*. Mais informações na Seção 2.3.

Com este trabalho, Gale e Shapley definiram um algoritmo chamado *Deferred Acceptance* (DA), e provaram matematicamente que, para este tipo de mercado, seu algoritmo sempre terminaria encontrando um *matching* estável em um número finito de etapas (Nisan, 2007). O algoritmo DA se baseia na ideia de que as propostas de alocação podem ser aceitas de forma iterativa até que todos os jogadores estejam devidamente alocados em um *matching*.

Essa teoria foi usada para tratar de problemas do mundo real como alocação de alunos em dormitórios nas universidades, trabalhadores em empresas, professores em instituições de ensino, sendo capaz de atender a um vasto número de mercados que ainda não foram explorados.

2.2.3 1974 - *Matching* para Mercados de Um Lado

No modelo teórico proposto por Shapley e Scarf (1974) foi apresentado um mercado de bens indivisíveis onde cada jogador tem uma casa e deseja trocar essa casa pela casa de outro participante. Nesse mercado temos um conjunto de jogadores $a \in A$, um conjunto de casas $h \in H$, onde cada jogador a é proprietário de uma casa h , e um conjunto de listas de preferências para cada jogador $P_a \in P$, onde a ordena todas as casas disponíveis nesse mercado, segundo seu desejo de troca.

Como somente os jogadores a possuem preferências sobre os recursos disponíveis, esse problema de alocação ficou conhecido como mercado de *matching* de um lado (*one-sided matching market*). A solução foi elaborada pelos autores e ficou conhecida como algoritmo *Top Trading Cycles* (TTC).

Esse foi um passo importante na concepção da análise e soluções para muitos outros mercados semelhantes e instituições. Nos Estados Unidos, os mecanismos TTC baseados em leilão e pagamentos monetários têm sido desenvolvidos para auxiliar no estudo de concorrências públicas, como na área de eletricidade, gás natural, emissoras de rádio, e casas hipotecadas. Outros mecanismos também foram desenvolvidos para alocar recursos em ambientes onde transferências monetárias não são utilizadas ou são proibidas: de transplante de órgãos, de vagas em escolas de nível médio, e vagas em dormitórios em universidades (Abdulkadiroğlu e Sönmez, 1999; Roth *et al.*, 2004; Sönmez e Ünver, 2011).

2.3 O Problema do Casamento Estável

Admita que existem dois conjuntos disjuntos e finitos de jogadores, um denominado por M , representando os homens m_1, m_2, \dots, m_n , e outro denominado W , representando as mulheres w_1, w_2, \dots, w_n , contendo n elementos cada um.

Cada homem m_i e mulher w_i , onde $i = 1, \dots, n$, possui uma preferência estrita, completa e transitiva sobre os elementos do outro conjunto.

Por *completa*, entende-se que todos os elementos de um conjunto podem ordenar todos os elementos do outro conjunto em relação a qualquer escolha possível. Isto é, entre duas escolhas factíveis, sempre é possível dizer se a primeira é ao menos tão boa quanto a segunda, se a segunda é ao menos tão boa quanto a primeira, ou se existe uma relação de indiferença entre as duas alternativas. Por exemplo, seja x e $y \in A$, então o jogador deve informar se x é preferível a y , se y é preferível a x , ou se x é indiferente a y .

Por preferências *estritas* entende-se que os elementos deste mercado devem classificar cada um dos elementos do conjunto oposto de acordo com uma ordem estrita de preferência, de forma que o jogador m_i , por exemplo, deve escolher obrigatoriamente uma ordem para as mulheres w_1, \dots, w_i , sem indicar indiferença entre elas.

Quanto à lista de preferência ser *transitiva* significa que existe consistência nas escolhas realizadas através da relação de preferência sobre um conjunto. Por exemplo, se o homem m prefere a mulher w_1 ao invés da mulher w_2 e a mulher w_2 ao invés da w_3 , então ele prefere a mulher w_1 ao invés da mulher w_3 .

Neste caso, se a lista de preferências é completa e transitiva, ela é chamada *racional*. Na teoria dos jogos os jogadores são considerados racionais se eles tomam decisões baseados em preferências racionais.

Estas listas individuais de preferências ordenadas podem ser representadas como um conjunto $P(m)$ sobre o conjunto $W \cup \{m\}$ onde $P(m) = \{w_2 \succ w_1 \succ m \succ w_3 \succ \dots \succ w_n\}$ significa que o homem m prefere estritamente formar um par com a mulher w_2 ao invés da mulher w_1 . Se o homem m não conseguir ser alocado com a mulher w_2 então ele prefere ficar com a mulher w_1 a ficar solteiro. Se ele não conseguir ficar com a mulher w_1 então ele prefere permanecer solteiro a casar com a mulher w_3 , e assim por diante.

De forma similar, existe um conjunto $P(w)$ sobre o conjunto $M \cup \{w\}$ onde $P(w) = \{m_5 \succ m_3 \succ m_1 \succ w \succ \dots \succ m_n\}$ representa a lista ordenada das preferências da mulher w .

Uma mulher w é uma parceira *aceitável* para um homem m se e somente se $w \succ m$. E dizemos que m é aceitável para w se e somente se $m \succ w$, ou seja, w prefere formar par com o homem m a ficar solteira.

Denotamos $P_M = \{P(m_1), \dots, P(m_n)\}$ o conjunto de preferências dos homens e $P_W = \{P(w_1), \dots, P(w_n)\}$ o conjunto de preferências das mulheres. Portanto, $P = \{P_M, P_W\}$ representa as listas de preferências de todos os jogadores desse mercado.

Um *matching* μ é uma associação de elementos de um conjunto aos elementos de outro conjunto, na forma $\mu = M \times W$.

Dado os conjuntos de preferências $P_{m'} = \{w' \succ w''\}$ e $P_{w'} = \{m' \succ m''\}$, dizemos que um *par bloqueador* é formado por qualquer alocação onde m' e w' não formem um par (a formalização matemática é dada na Seção 5.3). Essa afirmação pode ser verificada simplesmente analisando $P_{m'}$ e $P_{w'}$ pois, independente de quais sejam as preferências de m'' e w'' , a primeira opção de alocação de m' e w' indica que eles sempre formarão um par $\{m', w'\}$, seja ou não através de um mecanismo de alocação (Roth e Sotomayor, 1989).

Um *matching estável* é representado por um resultado ótimo de alocação para todos os elementos dos conjuntos, isto é, onde não exista nenhum *par bloqueador*. Logo, para o exemplo acima, $\mu = \{\{m', w''\}, \{m'', w'\}\}$ representa um *matching* que não é estável e $\mu = \{\{m', w'\}, \{m'', w''\}\}$ representa um *matching* estável.

2.3.1 Algoritmo *Deferred Acceptance*

Para resolver o problema de *matching* em mercados de dois lados, alguns processos de alocação foram criados e utilizados em diversas partes do mundo (Roth e Sotomayor, 1989). Dentre os processos pesquisados, os que encontravam resultados estáveis eram baseados no mecanismo *Deferred Acceptance*, proposto por Gale e Shapley (1962).

Abaixo segue uma adaptação do processo DA no Algoritmo 1, em pseudocódigo, retirado de Gusfield e Irving (1989).

Algoritmo 1: *Deferred Acceptance*

```

Data:  $\langle M, W, P_M, P_W \rangle$ 
Result:  $\mu$  : na forma  $M \times W$ 
/* Enquanto existir algum homem do conjunto  $M$  não alocado */
1 while ( AnyIsFree( $M$ ) ) do
    /* Busca primeira mulher na lista de  $m$  a quem  $m$  não propôs ainda */
2      $w = \text{FirstNotProposed}(P(m))$ 
    /* Se a mulher  $w$  não estiver alocada com ninguém */
3     if ( IsFree( $w$ ) ) then
        /*  $m$  e  $w$  são temporariamente alocados entre si */
4         Pair( $m, w$ );
5     else
        /* Se o homem  $m$  é mais preferível que  $m'$ , o qual  $w$  está alocada */
6         if (  $P(w) = \{m \succ m'\}$  ) then
            /* Troca homem  $m'$  por  $m$  */
7             Pair( $m, w$ );
8             Free( $m'$ );
9         else
            /* Homem  $m$  é rejeitado pela mulher  $w$  */
10            MarkRejectedBy( $m, w$ );
11        end
12    end
13 end
    /* Retorna alocações */
14 return  $\mu$ 

```

Em resumo, o algoritmo DA funciona de forma iterativa para os passos 1 e k (linhas 1 à 13), da seguinte forma:

- *Passo 1*: cada elemento do conjunto M faz uma proposta para o elemento do conjunto oposto W , baseado na primeira escolha de sua lista de preferências. Cada mulher w que recebe uma ou mais propostas escolhe a que mais lhe é preferida, segundo sua lista de preferências. Todas as outras propostas são rejeitadas.
- *Passo k* : cada jogador que foi rejeitado no passo anterior faz uma proposta ao próximo elemento de sua lista de preferências, que ainda não o tenha rejeitado. Cada mulher que recebe uma ou mais propostas escolhe a que mais lhe é preferida. Todas as outras propostas são rejeitadas.
- *Parada*: o algoritmo termina quando não houver novas propostas a serem feitas.

Cada jogador termina alocado com quem ele estava associado no último passo, onde o resultado é sempre um *matching estável*. A prova da estabilidade pode ser verificada no trabalho de Gale e Shapley (1962), ou um aprofundamento maior quanto a esta metodologia pode ser consultado em Gusfield e Irving (1989) e Roth e Sotomayor (1989).

Complexidade do Algoritmo DA

Como cada homem $m \in M$ pode fazer no máximo uma única proposta à cada uma das mulheres $w \in W$, onde os conjuntos M e W são de tamanho n , a complexidade do algoritmo é, para o pior caso, $O(n^2)$. E o melhor caso é quando todos os homens m fazem sua primeira proposta para mulheres diferentes w , e todos serão aceitos sem recusas, resultando em $O(n)$ (Gusfield e Irving, 1989).

2.3.2 Algoritmo Confirma Estabilidade em *Matchings*

Abaixo é apresentado um algoritmo que verifica a estabilidade de um *matching*, adaptado de Gusfield e Irving (1989).

O Algoritmo 2 testa o *matching* μ em busca da existência de algum *par bloqueador*. Conforme provado por Gale e Shapley (1962), caso o resultado não possua nenhum par bloqueador, o resultado da alocação é considerado *estável*.

Na linha 1 o algoritmo garante que todos os homens $m \in M$ serão verificados. Na linha 2, a variável w recebe a mulher w que foi alocada à m , como resultado de $\mu(m)$. A linha 3 permite que a lista de preferências $P(m)$ do homem m seja percorrida, localizando cada mulher w' que é preferível à ele, do que a mulher w , a qual ele formou par. As linhas 3 e 4 confirmam se existe: (a) uma mulher w' mais preferível para m do que seu par w ,

Algoritmo 2: Confirma Estabilidade em *Matchings*

```
Data:  $\langle M, W, P_M, P_W, \mu \rangle$   
Result:  $\{m, w\}$  : representa um par bloqueador  
/* Para todos os homens  $m \in M$  */  
1 for (  $m := 1$  to  $n$  ) do */  
    /* Busca mulher  $w$  atual, alocada com  $m$  no matching  $\mu$  */  
2      $w = \mu(m)$  */  
    /* Para todas as mulheres  $w'$  mais preferíveis que  $w$  */  
3     for (  $P(m) = w' \mid \{w' \succ w\}$  ) do */  
        /* Se a mulher  $w'$  preferir estar alocada com  $m$  a seu par atual  $m'$  */  
4         if (  $P(w') = m \mid \{m \succ m'\}$  ) then */  
            /* Retorna par bloqueador */  
5             return  $\{m, w'\}$  */  
6         end */  
7     end */  
8 end */  
/* Retorna par bloqueador não encontrado */  
9 return  $\emptyset$  */
```

e (b) que esta mulher w' prefira mais m do que seu par m' . Ou seja, se $P(m) = w'$, tal que $\{w' \succ w\}$, e $P(w') = m$, tal que $\{m \succ m'\}$, existe um par bloqueador, e o *matching* não é estável.

Em qualquer situação onde isso aconteça, o homem m e a mulher w' não iriam seguir o *matching* formado em μ , onde um acordo externo geraria um resultado melhor para ambos.

Complexidade do Algoritmo de Estabilidade em *Matching*

Como o Algoritmo 2 executa para todos os homens $m \in M$, onde M possui tamanho n , o pior caso é quando a mulher w alocada para cada m é sempre a última em sua lista de preferências $P(m)$, e não existe par bloqueador em μ , resultando em uma complexidade $O(n^2)$ (Gusfield e Irving, 1989).

2.3.3 Exemplo de Aplicação - DA

O funcionamento do algoritmo DA é ilustrado através da reprodução do exemplo de Nisan (2007), com base no mercado teórico de casamentos de Gale e Shapley (1962). Este exemplo tem como objetivo encontrar um *matching* estável entre um conjunto de homens m e mulheres w , com base nas preferências de casamento tanto dos homens quanto das mulheres.

As preferências de alocação dos homens m e das mulheres w podem ser verificadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Lista de preferências para homens e mulheres no algoritmo DA (Nisan, 2007)

$\succ m_1$	$\succ m_2$	$\succ m_3$	$\succ w_1$	$\succ w_2$	$\succ w_3$
w_2	w_1	w_1	m_1	m_3	m_1
w_1	w_3	w_2	m_3	m_1	m_3
w_3	w_2	w_3	m_2	m_2	m_2

Dadas estas preferências, o algoritmo procede como se segue. Em primeiro lugar, cada homem faz uma proposta de casamento à mulher mais bem colocada em sua lista de preferências. Em seguida, as mulheres aceitam temporariamente essas propostas com base em suas próprias listas de preferências, da seguinte forma: a) se uma mulher recebe apenas uma proposta e ainda não está alocada com nenhum homem, ela aceita formar par com esse homem, ou; b) caso ela já esteja temporariamente alocada com um homem, ela escolhe o mais preferido, segundo sua lista de preferências, rejeitando o(s) outro(s). Em seguida, cada homem rejeitado faz uma nova proposta à mulher mais bem colocada em sua lista de preferências, que ainda não o tenha rejeitado. As mulheres que receberam propostas se comportam novamente como descrito em (a) e (b). E assim o processo passa por iterações até que nenhum dos homens tenha mais mulheres para propor casamento e todas as mulheres receberam pelo menos uma proposta. Esse processo pode ser visto em detalhes em Roth e Sotomayor (1989).

Para as listas de preferências apresentadas na Tabela 2.1, o algoritmo encontra uma solução estável da seguinte forma:

- m_1 , m_2 e m_3 propõe casamento às mulheres w_2 , w_1 e w_1 , respectivamente;
- w_2 está sozinha e aceita m_1 ;
- w_1 aceita m_3 e rejeita m_2 , com base em sua própria lista de preferências;
- m_2 propõe à mulher mais bem colocada em sua lista de preferências, que ainda não o rejeitou, neste caso w_3 ;
- w_3 está sozinha e aceita m_2 ;
- O algoritmo termina com um *matching* estável $\mu = \{\{m_1, w_2\}, \{m_2, w_3\}, \{m_3, w_1\}\}$.

Através de um exemplo semelhante, os autores procuraram um modo satisfatório de casar todos os membros da comunidade, obtendo um conjunto de casamentos estáveis. Eles também definiram com sendo estável uma situação onde, levando em conta as preferências de todos os jogadores, nenhum casal pode melhorar seu resultado no mercado.

De forma inversa, um resultado não estável significa que existe a situação onde um homem e uma mulher que não estão casados entre si preferem um ao outro, aos seus atuais companheiros. Tal situação é claramente indesejável, pois o resultado computado por um processo qualquer não será respeitado pelos participantes do mercado. Se existir instabilidade no resultado, pelo menos dois ou mais jogadores podem melhorar seus resultados através da formação de subgrupos com interesses particulares, chamados coalizões.

Se existir mais de um resultado estável, regras devem ser definidas para escolher qual das soluções estáveis é a preferida. Entretanto, uma atribuição estável é chamada ótima se todos os jogadores estão pelo menos tão satisfeitos com ela, como com qualquer outra atribuição estável.

2.4 Resumo do Capítulo

O presente Capítulo apresentou a fundamentação teórica dos principais conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Nesta parte foram abordados brevemente: o contexto histórico da teoria dos jogos com ênfase em mercados de *matching*, modelos básicos de alocação de recursos, *matching* para mercados de um e de dois lados, o problema clássico do casamento estável, o algoritmo *Deferred Acceptance* utilizado na distribuição das alocações, um algoritmo para verificação de estabilidade no resultado calculado, e um exemplo de aplicação do mecanismo DA.

Através do conteúdo abordado verifica-se que desde os anos 1950, os mecanismos de *matching* vêm sendo utilizados na solução de uma ampla gama de problemas, como processos de contratações em mercado de trabalho, admissão de estudantes em universidades, *design* de redes e Internet, e alocação de órgãos entre pacientes e doadores, entre outros (Ergin e Sönmez, 2006; Gai *et al.*, 2007; Roth *et al.*, 2004). A partir dos anos 1960, a teoria dos jogos passou a analisar características desejáveis nos resultados encontrados, como estabilidade e possibilidade de manipulação por parte dos jogadores.

Tanto o Algoritmo 1, *Deferred Acceptance*, quanto o Algoritmo 2, para testar estabilidade de *matching*, permitem um melhor entendimento do funcionamento do mecanismo DA, para alocação de recursos em mercados de dois lados. O algoritmo utilizado no modelo proposto neste trabalho funciona com base nos princípios apresentados.

Capítulo 3

Alocação de Slots no ATM

O processo de alocação de *slots* é uma tarefa de fundamental importância que ocorre nas pistas dos aeroportos. Definir quais aeronaves irão pousar ou decolar, bem como sua ordem, é um dos processos básicos que são realizados diariamente para a geração do cronograma de voos das pistas em operação.

A correta compreensão dos elementos que formam o cenário do tráfego aéreo, o tratamento da coordenação de agentes com interesses diversos, dos problemas e restrições envolvidas nos algoritmos de alocação de *slots*, e das definições necessárias à formalização de um mecanismo de alocação estratégica de recursos, são de fundamental importância ao entendimento do modelo proposto neste trabalho.

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos envolvidos no processo de alteração do cronograma original de voos, seja por problemas relacionados ao congestionamento dos setores aéreos ou ao mau tempo previsto pelos órgãos especializados.

3.1 Gerenciamento de Tráfego Aéreo

O setor de transporte aéreo executa um papel fundamental para o desenvolvimento e o crescimento de um país. Os voos operados diariamente têm uma importância reconhecida em diversas áreas, atendendo a funções de turismo, transporte de pessoas e distribuição de cargas (Lulli e Odoni, 2007). Os fluxos culturais, comerciais e industriais são afetados por serviços aéreos, bem como, seus resultados influenciam fortemente as contas internas e externas dos governos, por meio de receitas e despesas realizadas em moeda nacional e internacional (Crespo e Weigang, 2010).

Para controlar o fluxo dessas aeronaves, a atividade do Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management* – ATM) tem por objetivo garantir a segurança e a fluência de voos, tratando possíveis desbalanceamentos entre a demanda pela utilização do espaço

aéreo e a capacidade da infraestrutura aeronáutica e aeroportuária existente (Weigang *et al.*, 2010).

O ATM segue normas e métodos bem definidos, recomendados pela Organização de Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization* – ICAO). No Brasil, essas normas e métodos são segmentados em três atividades principais, onde cada uma é composta por processos específicos, coordenados, cooperativos e simultâneos.

O primeiro serviço prestado pelo ATM realiza atividades referentes ao Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management* – ASM), buscando prover um nível de disponibilidade suficiente para atender à demanda de tráfego. O segundo serviço prestado é o órgão de controle de tráfego aéreo (*Air Traffic Control* – ATC), sendo responsável por atividades de separação segura entre aeronaves, e o fornecimento de informações aos pilotos, de forma a organizar e agilizar o fluxo de tráfego, evitando colisões. A terceira atividade é o Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management* – ATFM), sendo responsável por garantir o melhor fluxo de tráfego aéreo possível, através de procedimentos de ajuste de fluxo.

Segundo Crespo e Weigang (2010), o ATFM é considerado uma tarefa extremamente complexa, altamente especializada e fortemente baseada na experiência do gerente de tráfego. Suas atividades tratam de questões críticas como eficiência (fluência e redução de atrasos), equidade (trabalhar com diferentes companhias aéreas), adaptabilidade (tratar condições meteorológicas), confiança e segurança (gerenciar aeroportos).

Conforme definido pela Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO), o ATFM, também conhecido como *Demand and Capacity Balancing* (DCB), é aplicado segundo três fases de planejamento, o Estratégico, o Pré-tático e o Tático (ICAO, 2005).

No estágio Estratégico, as ações são tomadas com antecedência de dois a seis meses antes de entrar em vigor. A fase de Planejamento Pré-tático envolve ações que devem ser tomadas no dia anterior ao dia em que entrará em vigor. E na fase de operações Táticas, as ações são realizadas no dia em que as mesmas entrarão em vigor.

Com o objetivo de melhorar os processos vinculados ao ATFM, foi criada a filosofia da tomada de decisão colaborativa (CDM).

3.2 Tomada de Decisão Colaborativa (CDM)

Nos anos 1990, a filosofia da tomada de decisão colaborativa (*Collaborative Decision Making* - CDM) foi considerada um novo paradigma para o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo (ATFM). Ela foi elaborada com base na premissa de que uma evolução nos processos de comunicação e na troca de informações entre os órgãos de controle de tráfego aéreo (*Air Traffic Control* - ATC) e as companhias aéreas levaria a melhores decisões no

gerenciamento do tráfego de aeronaves (Ball *et al.*, 2005; Ball e Hoffman, 1998; Hoffman, 1997). Na época, a troca de informações entre a *Federal Aviation Administration* (FAA) e as companhias aéreas, ambas participantes do CDM nos Estados Unidos, possibilitou a elaboração dos processos atuais dos programas de espera em solo (*Ground Delay Program* - GDP).

3.2.1 Airport CDM (A-CDM)

Na Europa, a tomada de decisão colaborativa em aeroportos (A-CDM) é baseada na troca de dados entre os participantes do processo de forma a melhorar a compartilhamento de informações do cenário presente (Brinton *et al.*, 2011). Ela fornece uma estrutura focada na gestão de operações de decolagem e procura eliminar a mentalidade *first come first serve* do gerenciamento das pistas dos aeroportos. Este sistema está em uso em muitos aeroportos europeus, incluindo Bruxelas, Munique e Frankfurt. O A-CDM é dividido nos seguintes elementos:

- Compartilhamento de informações
- Marcos de Aproximação
- Tempo de taxiamento Variável
- Sequenciamento pré-decolagem
- Condições Adversas
- Gerenciamento Colaborativo de Atualização de Voos

Um membro do processo A-CDM é um interveniente de um aeroporto que participa do processo CDM. Logo, o A-CDM é implementado no ambiente do aeroporto, através da introdução de procedimentos operacionais e processos automatizados.

Os principais parceiros do processo A-CDM, segundo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), são:

- Operador do Aeroporto
- Operadores das Aeronaves
- Operadores de Tráfego em Solo
- Companhias de Degelo de Aeronaves
- Provedores de Serviço de Navegação Aérea (ATC)

- Operadores de Rede
- Serviços de Suporte (Polícia, Imigração, etc.)

Na Figura 3.1 é apresentado um resumo dessas informações.

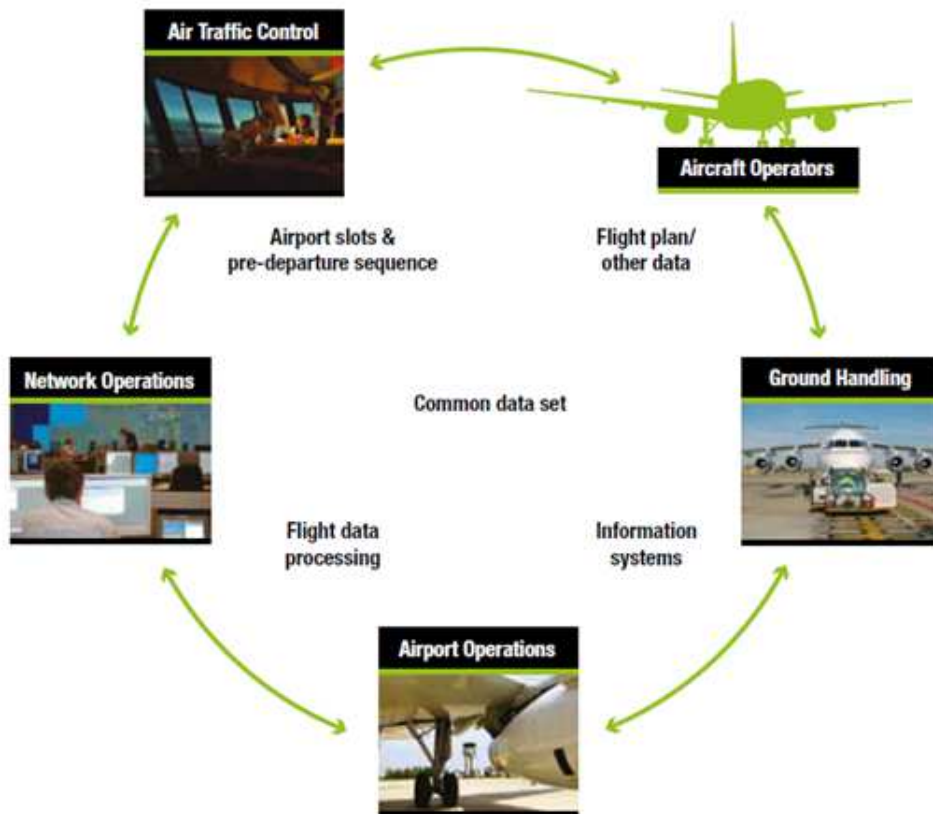


Figura 3.1: Visão geral do A-CDM. Fonte original em inglês: (EUROCONTROL, 2012)

Segundo Goldman (2013), a proposta A-CDM é fortemente focada nos parceiros (gestor do aeroportos, gerentes de taxiamento e pistas e o gestor do controle de tráfego aéreo (ATC)) que trabalham em conjunto de forma mais eficiente e transparente.

3.2.2 Surface CDM (S-CDM)

Nos Estados Unidos, os princípios do conceito A-CDM Europeu são usados no Surface CDM (S-CDM). Essa versão do CDM reconhece as diferenças existentes nas operações aeroportuárias entre a Europa e o Sistema do Espaço Aéreo Nacional dos Estados Unidos (*National Airspace System - NAS*).

Segundo Goldman (2013), o S-CDM pode ser definido como um conjunto de recursos e procedimentos bem definidos, que facilitam o gerenciamento proativo de filas de partida através de uma avaliação contínua da capacidade e da demanda dos aeroportos. Isso

permite uma forma de melhorar a gestão segura e eficiente dos fluxos de tráfego em aeroportos. O autor ainda aborda os princípios da proposta S-CDM como sendo fornecer:

- Informações certas para as pessoas certas, na hora certa
- Dados de alta qualidade
- Frequência adequada
- Uma consciência comum de forma a permitir aos parceiros otimizar a resposta coletiva a uma situação operacional
- Uma melhor compreensão da situação da perspectiva tática e estratégica
- Uma tomada de decisão informada
- Uma alavancagem de recursos disponíveis de todos os parceiros
- A capacidade de medir o desempenho para todos os parceiros
- A maximização da utilização dos recursos disponíveis dentro das restrições conhecidas

Segundo (Brinton *et al.*, 2011), as principais diferenças entre o A-CDM e o S-CDM, são relacionadas ao fato que:

- portões de estacionamento são atribuídos por operadores de voo
- áreas de rampa são controladas por operadores de voo, ou não controladas em alguns casos
- não existe disponibilidade de informação de linha de voos
- uma estrutura de controle altamente flexível é necessária devido ao ambiente dinâmico.

Com sua implantação espera-se: uma melhor integração entre os intervenientes do aeroporto; um gerenciamento eficiente do ponto de vista tático nos movimentos das aeronaves nos aeroportos; uma melhor coordenação da fila das pistas; uma harmonização global e sinergia com os demais aeroportos; melhoria na eficiência operacional quanto à aquisição de dados, análise e planejamento, cálculo automático de desequilíbrio entre oferta e demanda, e quadro completo da situação ATM.

3.3 Programas de Espera em Solo no ATM

Em um dia normal em um aeroporto, as operações de voo agendadas são previamente alocadas em uma fila de decolagem/pousos, composta por *slots* ATC. Um *slot* ATC pode ser visto como um tempo mínimo necessário para que uma aeronave possa realizar uma operação de decolagem ou pouso na pista de um aeroporto controlado (ICAO, 2005).

A quantidade máxima de aeronaves que podem pousar em um aeroporto, em um determinado período, é conhecida como *taxa de chegada* de um aeroporto (*Airport Arrival Rate* – AAR). A mesma analogia pode ser feita na definição da *taxa de decolagem* de um aeroporto (*Airport Departure Rate* – ADR).

Caso seja detectado que um setor do espaço aéreo ficará congestionado em determinado momento do dia, cabe ao gerente de tráfego aplicar uma medida restritiva, buscando reduzir a quantidade de aeronaves no local afetado. Esta redução tem como objetivo manter uma quantidade segura de voos operando em um mesmo setor de controle, evitando o congestionamento.

Apesar de existirem diversas medidas restritivas, como o *ground holding delay*, *airborne holding delay*, *miles-in-trail*, *reroute*, *slot swapping*, entre outras, por razões de segurança, é dada preferência às ações que envolvem soluções de espera em solo. É de senso comum a premissa de que é mais seguro alterar as condições de voo de uma aeronave que se encontra em solo do que no ar (Butler, 1998; Hoffman, 1997; Vossen e Ball, 2006a).

Quando um programa de espera em solo (*Ground Delay Program* - GDP) é aplicado, as capacidades de chegada (AAR) de alguns aeroportos são reduzidas. Desta forma, os voos que deveriam chegar durante os horários previstos de congestionamento são atrasados em suas decolagens. Tal medida restritiva resulta na necessidade de uma alteração no cronograma de alocação de *slots* original dos voos que utilizarão as pistas desses aeroportos.

Neste contexto, o GDP pode ser entendido como um processo multifases que trata o gerenciamento de alocação da fila de *slots* de aeroportos, impactado por restrições de capacidade operacional. Ele é baseado em algoritmos e troca de informações entre agentes, sendo definido e aplicado pelos órgãos de controle de tráfego (ATC) e atualmente contando apenas com a participação das empresas aéreas no processo de decisão e de troca de informações (Vossen e Ball, 2006a).

3.4 Modelos e Algoritmos Básicos do CDM

A realocação de aeronaves na fila de *slots*, ocasionada por atrasos impostos aos voos previamente selecionados, deve seguir regras que respeitem os interesses de segurança e fluência dos órgãos ATC e de justiça na redistribuição de *slots* entre das companhias

aéreas. A tentativa inicial de elaboração dos programas de espera em solo que respeitasse essas premissas foi realizada através do algoritmo *Grover Jack*.

3.4.1 Modelo Grover Jack

No início da elaboração da filosofia CDM, a implementação de um GDP era realizada por um algoritmo *first-come, first-served* conhecido como *Grover Jack*. A principal característica deste algoritmo é que ele preservava a ordem original dos voos (Butler, 1998).

Se um aeroporto era afetado por um programa de espera em solo (GDP), o *Grover Jack* realocava sua fila de *slots* simplesmente redistribuindo os horários originais em um novo cronograma de *slots*.

Nesse caso, se o órgão de controle de tráfego aéreo (ATC) reduzia a capacidade de chegada do aeroporto (AAR), o *Grover Jack* revisava os horários estimados de chegada (*Estimated Time of Arrival* – ETA) de cada um dos voos afetados para um horário de chegada controlado (*Controlled Time of Arrival* – CTA).

Após essa etapa, uma segunda etapa permitia que as companhias aéreas se ajustassem ao novo cronograma, através de possíveis substituições e cancelamentos de seus voos. Na Figura 3.2 é apresentado o processo de forma simplificada.

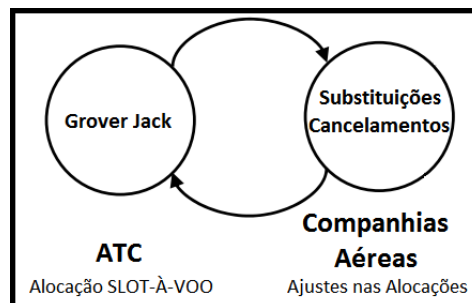


Figura 3.2: A arquitetura Grover Jack. Fonte: adaptado de Vossen e Ball (2006a).

Apesar de ser um processo simples, as companhias aéreas encontraram alguns problemas, sendo o mais conhecido, a questão da penalidade dupla (*double penalty issue*).

Esses problemas podem ser exemplificados como segue:

- suponha que um voo foi originalmente programado para chegar às 10 horas em um aeroporto, mas teve um problema mecânico que irá atrasar em 30 minutos a sua partida. Caso este fato seja informado com antecedência, o voo teria seu horário estimado de chegada (ETA) atrasado em 30 minutos. Caso esse mesmo voo fosse posteriormente afetado em 30 minutos por um GDP, o atraso total do voo seria de 60 minutos (penalização dupla), fazendo com ele chegue apenas às 11 horas em seu aeroporto de destino;

- suponha que um voo da companhia aérea fictícia *AIR* é cancelado por qualquer motivo. O *slot* originalmente alocado àquele voo passaria a ser disponibilizado para o próximo voo, sendo este pertencente à companhia aérea *AIR* ou não;
- suponha que um voo da companhia aérea *AIR* seja cancelado. Se o voo seguinte não possuir um horário compatível de chegada ao *slot* que ficou vago, esse *slot* será “pulado” durante o processo de redistribuição.

Por esses motivos, as companhias aéreas não tinham o incentivo necessário para relatar as situações de atraso e cancelamento de seus voos em tempo hábil (Butler, 1998). Além disso, neste processo, o gerente de tráfego não conseguia priorizar categorias de voos, como voos internacionais, governamentais ou militares, por exemplo.

Para corrigir esta situação e implementar a filosofia CDM com tratamentos mais justos de realocação de *slots* para as aeronaves, o programa de espera em solo (GDP) foi criado através de um processo realizado em três fases, sendo duas executadas por algoritmos com funções distintas. Este processo, construído em parceria entre a *Federal Aviation Administration* (FAA) e as companhias aéreas participantes do CDM, obrigatoriamente deve garantir os interesses destes intervenientes (Ball *et al.*, 2001; Butler, 1998; Hoffman, 1997; Vossen e Ball, 2006a).

3.4.2 Modelo Clássico CDM

O modelo clássico de realocação de *slots*, e ainda em uso pelos órgãos ATC, é baseado no paradigma CDM. No CDM, é essencial que as companhias aéreas forneçam informações confiáveis, fidedignas e de forma tempestiva aos órgãos de controle de tráfego (ATC), para um melhor resultado do processo. Podemos ver as três fases do modelo CDM clássico na Figura 3.3.

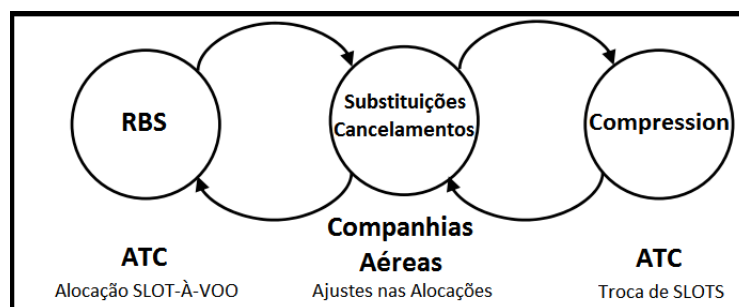


Figura 3.3: A arquitetura CDM clássica. Fonte: adaptado de (Vossen e Ball, 2006a)

Uma explicação mais detalhada para cada fase apresentada na Figura 3.3 é dada à seguir: após a redução da *airport arrival rate* (AAR) por um tempo pré-definido, valor que representa a capacidade de utilização de pista do aeroporto afetado, a quantidade

de aeronaves que irão operar naquele local também é reduzida. Logo, a primeira fase do GDP clássico trata a redistribuição dos SLOTS para a nova quantidade de aeronaves que podem ser operadas por hora no aeroporto.

Algoritmo Ration-By-Schedule

Segundo Vossen e Ball (2006a), é objetivo do algoritmo *Ration-By-Schedule* (RBS):

1. criar um novo cronograma de *slots* com horários revisados; e
2. alocar os voos originalmente presentes na antiga lista neste novo cronograma, preservando a ordem original de chegada definida para cada aeronave.

A Figura 3.4 ilustra um exemplo do algoritmo RBS.

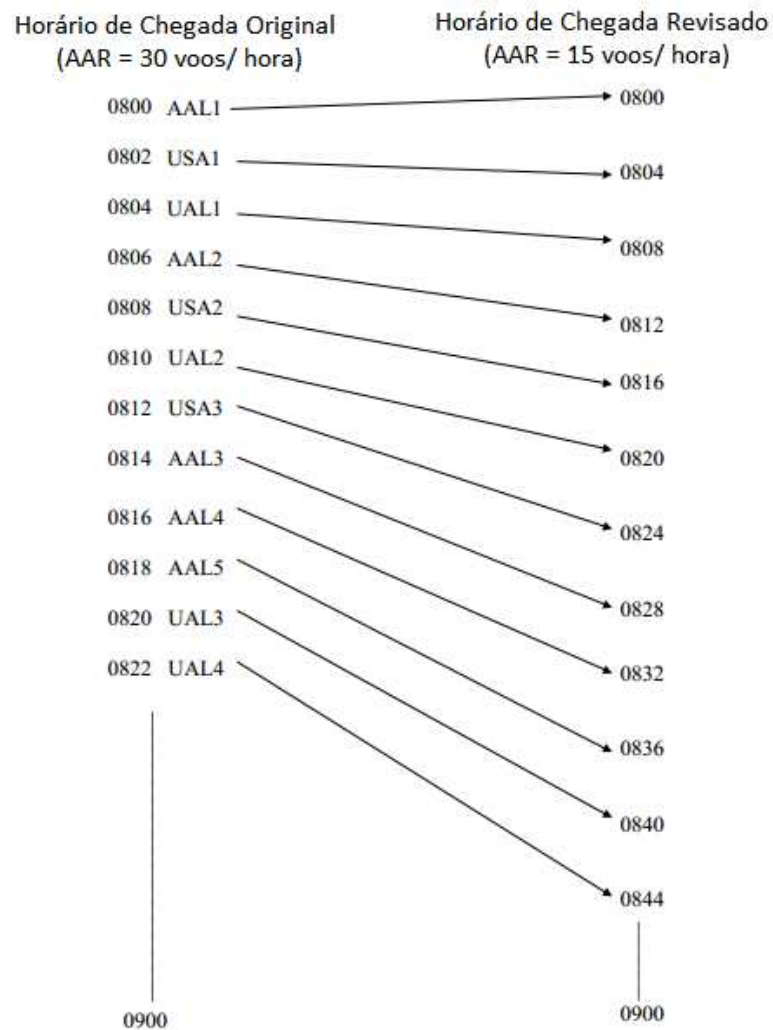


Figura 3.4: O algoritmo RBS. Fonte original em inglês: (Butler, 1998)

Segundo Butler (1998), esse processo foi construído através de um conceito fundamental no paradigma CDM: o conceito de “propriedade”. Esse conceito indica que em um GDP “ideal”, uma dada companhia aérea deveria receber uma porcentagem de SLOTS igual à porcentagem que ela tinha no cronograma original de voos (*Official Airline Guide* – OAG). Logo, o RBS não utiliza o horário estimado de chegada (ETA) como o *Grover Jack*, mas sim os horários originais.

Processo de Substituições e Cancelamentos

É importante notar que o efeito dos atrasos sobre as aeronaves é cumulativo. Por exemplo, se a capacidade AAR de um aeroporto qualquer for reduzida de 30 para 15 voos por hora, não será gerado apenas um atraso de 4 minutos para cada aeronave afetada pela GDP. A primeira aeronave no novo cronograma não sofrerá atraso algum, a segunda aeronave utilizará a pista com 2 minutos de diferença do horário original, a terceira irá operar com um atraso de 4 minutos, e assim por diante. Logo, a décima e a vigésima aeronaves do novo cronograma de *slots* poderão receber até 36 e 76 minutos de atraso cada uma, respectivamente, em relação aos seus horários de chegada originalmente previstos.

Nestas condições, foi criada a oportunidade das companhias aéreas analisarem o resultado informado pelo algoritmo e tomarem decisões estratégicas, visando mitigar os efeitos adversos do GDP sobre suas operações de voo. Desta forma, na etapa denominada *Substituições e Cancelamentos*, cabe às empresas aéreas:

1. Comunicar tempestivamente possíveis atrasos, devidos a falhas mecânicas e outros problemas operacionais;
2. Comunicar tempestivamente cancelamentos, devido a ajustes internos e decisões estratégicas das companhias aéreas sobre seus voos;
3. Comunicar tempestivamente substituições de voos entre *slots* de “propriedade” da mesma companhia aérea, onde um voo pode ser priorizado em detrimento de outro.

Nesta etapa pode ser verificado que, segundo o conceito de “propriedade”, as companhias aéreas possuem total controle sobre seus *slots*, sem invadir as alocações das concorrentes. Esta fase preserva os interesses das companhias aéreas, possibilitando a priorização estratégica de seus voos, onde estas passam a ter o incentivo necessário para fornecer informações precisas sobre seus voos, quanto a possíveis atrasos e cancelamentos (Butler, 1998).

Entretanto, após os procedimentos de cancelamentos e substituições, alguns *slots* do novo cronograma ficarão sem utilização, tornando o novo processo de alocação inefici-

ente (Vossen e Ball, 2006a). Para explicar com maior detalhamento o processo que trata esses *slots* vazios, na próxima seção veremos o algoritmo *Compression*.

3.4.3 Algoritmo *Compression*

Para otimizar o processo, onde alguns *slots* do novo cronograma ficariam sem utilização, foi criado um algoritmo, conhecido como *Compression*, que preenche os *slots* vazios segundo regras pré-acordadas entre os órgãos de controle de tráfego (ATC) e as companhias aéreas.

1. **Mapeamento *Intra-Airline*** – atualizar o novo cronograma segundo as informações de atrasos, cancelamentos e substituições da etapa anterior;
2. **Mapeamento *Inter-Airline (Compression)*** – identificar o próximo *slot* vago e a companhia aérea proprietária, realizando os seguintes passos:
 - a Buscar por um voo pertencente àquela companhia aérea que possa ser movido para o *slot* vago, segundo os seguintes critérios de elegibilidade:
 - Não permitir a antecipação de uma decolagem segundo os horários originais do voo, de forma a não prejudicar os passageiros;
 - Não permitir a troca entre *slots* por um voo que tenha uma redução de atraso inferior a um parâmetro pré-definido (10 minutos, por exemplo), evitando despesas operacionais;
 - Permitir que o processo de substituição de *slots* possa ser realizado na íntegra pela companhia aérea responsável, através de um parâmetro pré-definido à partir do horário atual (por exemplo, 30 minutos). Se um voo que atenda aos critérios é encontrado, faça a troca do voo com o *slot* vazio, atualize o novo horário do *slot* que foi preenchido, e retorne ao passo 2a. Se não existem voos elegíveis para este *slot* vago, vá para o passo 2b.
 - b Buscar por um voo pertencente a outra companhia aérea que possa ser movido para o *SLOT* vago, segundo os critérios de elegibilidade definidos em 2a. Se um voo que atenda aos critérios é encontrado, faça a troca do voo com o *slot* vazio, faça a troca de propriedade de *slots* entre as companhias aéreas, atualize o novo horário do *slot* que foi preenchido, e retorne ao passo 2a. Se não existem voos elegíveis este *slot* vago, em todas as companhias aéreas do novo cronograma, vá para o passo 2.

De forma resumida, o algoritmo *Compression* funciona da seguinte forma: quando um *slot* é deixado vazio, o *Compression* tenta alocar a ele outro voo da mesma companhia

aérea “proprietária” daqueles *slots*. Se encontrar um voo possível segundo os critérios de elegibilidade, ele realiza a troca, mas se não existirem voos disponíveis, então o algoritmo buscará um voo pertencente à outra companhia aérea. Se encontrar, ele realiza a troca do voo entre os *slots*, trocando também a “propriedade” entre as companhias aéreas. Se não encontrar, ele simplesmente irá declarar o *slot* como inutilizado.

Modelo Formal

Um cronograma de pistas de aeroporto C é formado por $\langle F, S, A, O_F, O_S \rangle$, com F , S e A como conjuntos disjuntos e finitos, onde F representa os voos f_1, f_2, \dots, f_m com m igual ao número de voos, S representa os *slots* como s_1, s_2, \dots, s_n com n igual ao número de *slots*, e A representa as companhias aéreas como a_1, a_2, \dots, a_z com z igual ao número de companhias aéreas. Nesse cronograma, O_F representa o conjunto de proprietários dos voos $o_f \in O_F$, onde $o_f = \{f, a\}$ e O_S o conjunto de proprietários dos *slots* $o_s \in O_S$, onde $o_s = \{s, a\}$.

Essa versão do Algoritmo *Compression* foi modelada segundo descrições do processo em Butler (1998) e Vossen e Ball (2006a). É de responsabilidade do algoritmo tratar parâmetros restritivos de troca de *slots* para um voo ser considerado elegível, como tempos mínimos operacionais e horários mínimos para chegada nos aeroportos (Hoffman, 1997).

Segundo Butler (1998), esse modelo foi construído através de alguns conceitos fundamentais na filosofia CDM: o conceito de “propriedade”, onde a companhia aérea não pode invadir os *slots* das concorrentes; o conceito de “prioridade”, onde são tratados primeiro os voos da companhia aérea que é proprietária do *slot* vago, e; o conceito de “justiça”, onde cada companhia aérea recebe uma porcentagem de *slots* igual à porcentagem que ela tinha no cronograma original de voos (*Official Airline Guide* – OAG). Mais informações sobre esse processo podem ser consultadas em Hoffman (1997), Butler (1998) e Vossen e Ball (2006a).

Complexidade do Algoritmo *Compression*

A análise do *Compression* indica que o pior caso de execução é quando existe somente um voo f em todo o cronograma C e ele está ocupando o *slot* s no último *slot* do cronograma, sendo que:

- todos os demais *slots* estão vazios, e;
- esse voo f não pode ser alocado a mais nenhum outro *slot* s .

Como o Algoritmo *Compression* executa $s \leq (n - 1)$ vezes para percorrer todo o cronograma (linha 2), e a cada vez, pode executar $t \leq n$ para a companhia aérea proprietária

Algoritmo 3: Compression

Data: $\langle F, S, A, O_F, O_S \rangle$

Result: C : cronograma na forma $S \times F$, onde $c \in C \mid s \in S, f \in F, c = \{s, f\}$

```
1  $n = \text{Size}(S)$ 
  /* Percorre todos os slots do Cronograma */
2 for ( $s = 1; s \leq (n - 1); s++$ ) do
  /* Verifica se slots está vazio */
3   if ( $\text{IsEmpty}(s)$ ) then
    /* Analisa a partir do próximo slot, onde  $t \leq s$  */
4     for ( $t = s + 1; t \leq n; t++$ ) do
      /* Busca voos do mesmo proprietário do slot s vazio */
5       if ( $\text{IsEmpty}(s)$  and  $\text{IsNotEmpty}(t)$  and  $\text{Owner}(t) = \text{Owner}(s)$ ) then
        /* Verifica se slot é elegível para troca */
6         if ( $\text{IsEligible}(t, s)$ ) then
          /* Realiza troca de voos */
7           SwapFlight( $x, t$ );
8           SwapFlight( $t, s$ );
9           SwapFlight( $s, x$ );
10          end
11         end
12        end
        /* Se não encontrou voo do mesmo proprietário */
13       if ( $\text{IsEmpty}(s)$ ) then
        /* Analisa a partir do próximo slot, onde  $t \leq s$  */
14         for ( $t = s + 1; t \leq n; t++$ ) do
          /* Busca voos das outras companhias aéreas */
15           if ( $\text{IsEmpty}(s)$  and  $\text{IsNotEmpty}(t)$  and  $\text{Owner}(t) \neq \text{Owner}(s)$ ) then
            /* Verifica se slot é elegível para troca */
16             if ( $\text{IsEligible}(t, s)$ ) then
              /* Realiza troca de proprietário */
17               SwapOwner( $x, t$ );
18               SwapOwner( $t, s$ );
19               SwapOwner( $s, x$ );
              /* Realiza troca de voos */
20               SwapFlight( $x, t$ );
21               SwapFlight( $t, s$ );
22               SwapFlight( $s, x$ );
23             end
24           end
25          end
26         end
27        end
28      end
      /* Retorna novo cronograma */
29      return C
    */
```

do *slot* (linha 4), e $t \leq n$ para as demais companhias aéreas (linha 14), onde em ambos os casos $t = s + 1$, pode-se verificar que sua complexidade, no pior caso, é $O(n^2)$.

3.5 Problemática no Processo de Alocação de *Slots*

Dos algoritmos utilizados em um GDP, pode-se dizer que o *Compression* é o processo mais crítico, devido à manipulação que ele faz nas posições originais das aeronaves na fila de *slots*. As regras utilizadas nessa tarefa utilizam conceitos de *propriedade*, *justiça*, *elegibilidade*, entre outros.

Logo abaixo são apresentadas as principais características do algoritmo *Compression*:

- os *slots* de chegada são preenchidos sempre que possível;
- os voos da companhia aérea proprietária de um *slot* vago são considerados antes dos voos de outras companhias aéreas;
- uma companhia aérea que não pode usar seu *slot* vago sempre é compensada através da troca de propriedade de *slots* com outra companhia que possua um voo que preencha os critérios de elegibilidade;
- a troca de *slots* ainda permite novas possibilidades de alocação para outros voos da nova companhia aérea proprietária, aumentando o incentivo quanto às informações tempestivas e corretas;
- não existe uma forma da companhia aérea involuntariamente perder um *slot* de sua propriedade.

Desde a sua modelagem até os dias atuais, o algoritmo *Compression* têm apresentado diversas limitações em relação a filosofia CDM, quanto ao seu uso. Segundo Schummer e Rakesh (2013), o algoritmo não garante que as companhias aéreas informem, em alguns casos, o cancelamento de seus voos. Esse fato permite que a inutilização de *slots*, onde as companhias concorrentes não podem realocar seus voos para melhores posições no cronograma. Em outros casos mais sérios, o algoritmo pode gerar resultados não estáveis permitindo sua manipulação através de coalizões entre os participantes.

3.6 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos do gerenciamento do tráfego aéreo (ATM), uma breve explicação dos seus principais serviços, e um resumo da histórica do paradigma da tomada de decisão colaborativa (CDM) com sua implementação na

Europa, através do *Airport* CDM (A-CDM), e nos Estados Unidos, com o *Surface* CDM (S-CDM). Também são detalhados os processos dos programas de espera em solo (GDP), sua evolução através do modelo *Grover Jack*, e seus algoritmos básicos atualmente em uso, *Ration-by-Schedule* e *Compression*. Uma análise sobre as principais vantagens e deficiências do processo de alocação atual são mostradas no final do capítulo.

As informações dispostas nesse capítulo permitem a constatação da importância do ATM no cenário aéreo atual. Também fica clara a necessidade de adaptação de alguns processos face à evolução dos elementos que compõe esse cenário, como o aumento constante do volume de tráfego em razão da demanda, a desigualdade entre a oferta e demanda pelos recursos existentes, e a entrada de concessionárias gestoras de aeroportos, entre outros.

No próximo Capítulo, serão apresentadas algumas soluções propostas na literatura, que abordam esses problemas e outros do ATM.

Capítulo 4

Estado da Arte e Soluções para CDM

Neste capítulo é feita uma revisão dos trabalhos baseados em inteligência artificial e teoria dos jogos para resolver os problemas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo (ATFM). Apresentaremos os métodos de inteligência artificial aplicada ao programa de espera em solo, sistemas multiagentes para o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, a evolução do conceito da tomada de decisão colaborativa (CDM) e como os conceitos de teoria dos jogos tem sido aplicado ao gerenciamento de tráfego aéreo.

4.1 Soluções em Inteligência Artificial

O programa de espera em solo pode ser visto como um problema de alocação de recursos no qual uma quantidade limitada de *slots*, controlada dinamicamente pela capacidade operacional do aeroporto, é disponibilizada aos voos que desejam realizar operações de pouso e decolagens em suas pistas. A versão básica do problema, na qual tanto a demanda quanto a capacidade do aeroporto são consideradas determinísticas, foi primeiramente estudada por (Odoni, 1987). O trabalho de (Andreatta e Romanin-Jacur, 1987) possibilitou a formalização de um caso estocástico de um único aeroporto. Posteriormente, outras características foram incorporadas. Algumas das características incluídas foram: (a) um sistema especialista baseado em conhecimento projetado para o ATFM que executa modificações em tabelas de horários de voos, reescalando-as e reduzindo a sobrecarga em aeroportos durante horários de maior movimento (Weigang *et al.*, 1997); (b) a extensão de capacidades em rotas do cenário aéreo (Bertsimas e Stock-Paterson, 1998); (c) modelos que trabalham com a incorporação de *banking constraints* (aeroportos estratégicos das companhias aéreas) à solução proposta (Hoffman e Ball, 2000); (d) modelos onde as capacidades de chegada foram consideradas estocásticas (Ball *et al.*, 2003); (e) um modelo de previsão combinando atrasos em solo e no ar (Lulli e Odoni, 2007); (f) a utilização de arquiteturas para coordenação de agentes inteligentes (Tumer e Agogino, 2008).

4.1.1 Abordagem em Programação Inteira para GDP

Em Hoffman (1997), o autor utilizou modelos de programação inteira para resolver problemas combinatoriais no gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo.

O problema da espera em solo para um aeroporto (*single airport ground-holding problem* – SAGHP) e para múltiplos aeroportos (*multi-airport ground-holding problem* – MAGHP) foi modelado considerando as perspectivas: (a) de restrições laterais (*side constraints*) ao GHP, através de cinco modelos básicos com diversas variações do problema de espera em solo com restrições *banking* (*ground holding problem with banking constraints* – GHB); permitindo a centralização de operações (*hubbing operations*) em alguns aeroportos, para as companhias aéreas maiores; (b) da natureza estocástica da capacidade de chegada dos aeroportos, modelada através da programação inteira, e fornecendo uma troca ótima entre atraso em solo (*ground delay*) e atraso no ar (*airborne delay*).

Segundo Hoffman (1997), como problemas de ATFM são de natureza combinatória, eles podem ser perfeitamente adaptados à modelagem por programação inteira. Na sua proposta foram utilizadas propriedades de rede *dual*, conseguindo soluções inteiras diretamente do relaxamento da programação linear. O modelo proposto foi projetado para trabalhar em conjunção o paradigma da tomada de decisão colaborativa, discutindo amplamente sua história, conceitos e impacto no processo de tomada de decisão no gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo.

As formulações do GHB utilizaram conjuntos de dados com as seguintes informações: um conjunto de voos, uma coleção de *banks* (subconjuntos do conjunto de voos), o cronograma dos horários de chegada dos voos, e as capacidades dos voos (o número de passageiros que podem ser transportados). Essas capacidades foram usadas para computar a importância do voo na função objetivo.

O trabalho sobre *banking constraints* analisou muitas soluções alternativas. Ele envolveu o uso de variáveis de decisão auxiliares, a aplicação de técnicas especiais de desvio e o uso de *facet-inducing constraints*. O resultado foi a redução do tempo de computação e dos recursos necessários para resolver a programação inteira de forma ótima. A contribuição de Hoffman está no desenvolvimento de novas técnicas no campo da programação inteira, e no desenvolvimento de soluções práticas para o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo (ATFM).

4.1.2 Abordagem em Programação Inteira baseado em CDM

Ball *et al.* (2003) apresentam uma proposta de solução que reduz a quantidade de procedimentos de espera no ar (*Airborne Holding Problem* – AHP). Quando o modelo

detecta a situação onde uma aeronave deverá realizar uma espera em voo, ele calcula o intervalo de tempo que se deve aguardar antes da decolagem para que a aeronave não necessite realizar um procedimento AHP.

A solução envolve substituir a demanda determinística por uma demanda estocástica, mas sem apresentar um modelo de escolhas probabilísticas. O método utilizou uma generalização ao problema através de um modelo clássico de fluxo em redes.

Uma vez que a filosofia CDM é o processo atualmente utilizado pela *Federal Aviation Administration* (FAA) e pelas companhias aéreas, o modelo foi construído baseado na troca de informações interativa entre a associação dos elementos e processos em execução no sistema de controle de tráfego.

O modelo calcula o horário de decolagem através da diferença entre o tempo esperado de voo e o horário estimado de chegada. Para balancear a espera em solo (GHP) e a espera no ar são utilizados dois parâmetros que representam o custo por unidade de tempo para espera em solo (g), e o custo por unidade de tempo para espera em rota (a). O objetivo do modelo é manter uma relação onde $a > g$, priorizando procedimentos GHP nas soluções computadas.

4.1.3 Abordagem em Sistemas Multiagentes baseada em Aeroportos

Em Dib. *et al.* (2007), é proposto um sistema denominado *Sistema Multiagentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo* (ATFSM-MAS), para ser utilizado como um sistema distribuído que atua no auxílio ao ATFM. Foi elaborado um modelo que utiliza tecnologias de inteligência artificial, coordenação de multiagentes (Inteligência Artificial Distribuída – IAD), tecnologia *Web Service*, tecnologia de *Grid Computational* e de serviços.

O principal objetivo do sistema é resolver o problema de atrasos em horários de decolagem e pouso das aeronaves, otimizando o fluxo de tráfego aéreo através da previsão de congestionamentos e racionalização da utilização dos recursos em diferentes aeroportos (Dib. *et al.*, 2007). A arquitetura do ATFSM-MAS utilizou três tipos de agentes que atuam em conjunto em um aeroporto. A Figura 4.1 apresenta a arquitetura proposta.

Na execução do ATFM através de técnicas de negociação entre os diferentes agentes de cada aeroporto, cada tipo de agente executa tarefas bem definidas, conforme segue:

- **Agentes Pré-ATC:** gerenciar o fluxo de voos que chegam e que saem do aeroporto local, mantendo a escala de horários previstos. O módulo Diagnosticador realiza a identificação de congestionamentos e o Scheduler ajusta voos em conflito maximizando a utilização das pistas.

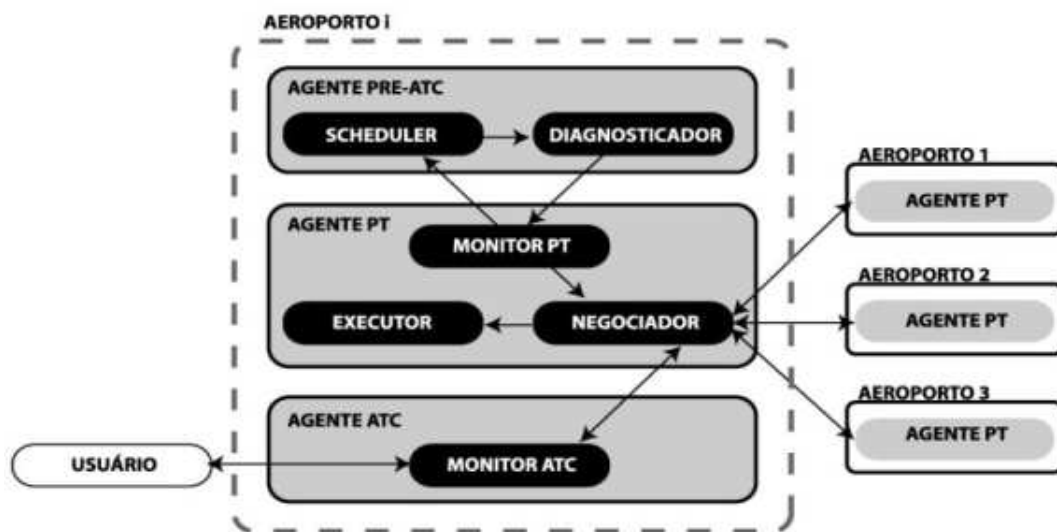


Figura 4.1: Arquitetura dos agentes no ATFSM-MAS. Fonte: Dib. *et al.* (2007)

- **Agentes PT** (Planejamento Tático): gerenciar o fluxo sobre todo o espaço aéreo, com uma duração mais longa de rastreamento. Os módulos Monitor PT, Executor e Negociador monitoram os agentes Pré-ATC, as negociações entre os agentes PT de outros aeroportos, o fluxo de tráfego aéreo esperado e geram novas escalas de horários, resultantes das negociações efetivadas, propagando essas escalas para os demais agentes envolvidos.
- **Agentes ATC**: manipular informações em tempo real, desempenhando o papel de interface entre os órgãos de controle (Torres de Controle de Aeroporto, Controle de Aproximação e Centros de Controle de Área) e as companhias aéreas e pilotos. O módulo Monitor ATC recebe informações dos voos que tiveram seus horários modificados por fatores externos cujos horários foram modificados devido aos ajustes realizados pelo agente PT.

A ideia básica de funcionamento da arquitetura do ATFSM-MAS é que, em cada aeroporto local participante do *Grid* de serviços, um agente autônomo monitora as aeronaves previstas para pousar e decolar em um intervalo de duas horas. Caso seja previsto um congestionamento local, o agente se comunicará com as aeronaves em rota, destinadas a pousar, com as aeronaves previstas para decolarem deste aeroporto e com os aeroportos de origem de voos causadores de conflitos, para negociação de uma solução.

A solução negociada pode resultar em: retenção no ar, para os voos que já estiverem em rota; atraso em solo no aeroporto de origem, para as aeronaves que ainda não decolaram, e atraso para os voos programados para decolarem do aeroporto congestionado.

4.1.4 Abordagem em Sistemas Multiagentes baseado em Fixos

Os pesquisadores Tumer e Agogino (2008) utilizaram algoritmos de aplicação em coordenação de multiagentes para o gerenciamento de tráfego aéreo. Como problemas complexos como a interação entre as aeronaves, aeroportos e controladores de tráfego são naturalmente distribuídos, os autores defendem que uma abordagem multiagente adaptativa se encaixa perfeitamente ao ATFM.

No trabalho proposto, as ações dos agentes são baseadas em informações sobre os voos, fornecidas por um simulador chamado *Future ATM Concepts Evaluation Tool* (FACET). Com a aplicação destas ações, o impacto é simulado no cenário aéreo pelo FACET e os agentes podem avaliar o resultado de suas próprias ações.

Nesta abordagem multiagente, a seleção dos agentes foi feita sobre localizações individuais sobre o solo, conhecidas como fixos. Cada agente busca maximizar uma função de avaliação do sistema, sendo responsável por qualquer aeronave que esteja transitando sobre seu fixo. O conjunto de ações dos agentes foi modelado da seguinte forma:

1. **Miles in Trail** (MIT): os agentes controlam a distância que as aeronaves têm que manter entre elas enquanto se aproximam de um fixo.
2. **Ground Delays**: os agentes controlam o tempo de atraso em solo para aeronaves que eventualmente passarão por um fixo.
3. **Rerouting**: os agentes controlam as rotas que passam por seu fixo, desviando as aeronaves através de outras rotas, evitando o congestionamento.

O modelo utiliza a Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning* – RL) para definir a coordenação entre os agentes. A cada ciclo, um agente toma uma ação e então recebe um valor de recompensa pelo resultado produzido por esta ação, de forma a reforçar a utilização de ações positivamente avaliadas (Sutton e Barto, 1998). A função de avaliação do sistema é focada em atrasos e congestionamentos, através de uma combinação linear destes dois termos, como segue:

$$G(z) = -((1 - \alpha)B(z) + \alpha C(z))$$

onde $G(z)$ é uma função do status total do sistema para o estado z , sendo $B(z)$ o tempo de atraso total para todas as aeronaves, em minutos, e $C(z)$ o número de aeronaves que excede as capacidades máximas previstas no sistema, configurando situações de congestionamentos. O valor de α é dado pela importância relativa destes dois fatores.

Além da função anterior, os autores também efetuaram simulações com outro modelo, onde a avaliação pudesse ser mais sensível aos estados/ações dos agentes, e fosse mais alinhada com a recompensa global do sistema.

$$D_i = G(z) - G(z - z_i + c_i)$$

onde z_i é o estado do agente i e todos os componentes de z que são afetados pelo agente i são substituídos por uma constante fixa c_i . Esta recompensa é chamada de recompensa diferencial, sendo efetiva em permitir a um agente enxergar os impactos de suas próprias ações. Assim, D_i depende do cálculo do termo de fator de contagem de $G(z - z_i + c_i)$, resultando na performance do sistema sem o agente i .

4.1.5 Abordagem em Sistemas Multiagentes baseada em Aeronaves

Na área de sistemas multiagentes, Wolfe *et al.* (2009) apresentaram um trabalho que utiliza o impacto dos atrasos aos passageiros e tripulação da aeronave na função de recompensa utilizada pelos agentes, de forma a direcionar melhores e piores decisões dos mesmos. A abordagem CATFM (*Collaborative ATFM*) foi escolhida por aumentar a troca de informações e distribuir a tomada de decisão, diminuindo a carga de trabalho para os centros de controle e aumentando a satisfação das companhias aéreas.

O sistema foi construído sobre a plataforma de simulação conhecida como *Brahms*, utilizada para modelar a colaboração entre agentes. A modelagem da simulação CATFM possui dois tipos principais de agentes:

1. **Agente TMU** (*Traffic Management Unit*): este agente trabalha como um monitor do espaço aéreo, detectando desbalanceamento entre capacidade e demanda e distribuindo estas informações entres os agentes. Em uma variação simplificada de simulação, um agente TMU deve aceitar ou rejeitar requisições de rotas de voo efetuadas pelo agente AOC. Em outras variações de simulação, o agente TMU tomará estratégias ótimas ou sub-ótimas, buscando maximizar algumas propriedades globais, como a performance do sistema, dada pela fluência segura de aeronaves, entre outras.
2. **Agente AOC** (*Airline Operations Center*): os agentes AOC são as interfaces entre as companhias aéreas e as unidades de controle de tráfego, comunicando informações de voos, alocações, e o valor de voo de cada aeronave, recebendo também qualquer informação transmitida de um agente TMU. Na variação mais simples da simulação, os agentes AOC selecionam rotas para seus voos, re-planejando quando estas solicitações de rotas são rejeitadas pela TMU, sempre procurando maximizar seus próprios objetivos, como uma aeronave que procura chegar o mais rápido possível ao seu destino, sem se importar com as demais aeronaves.

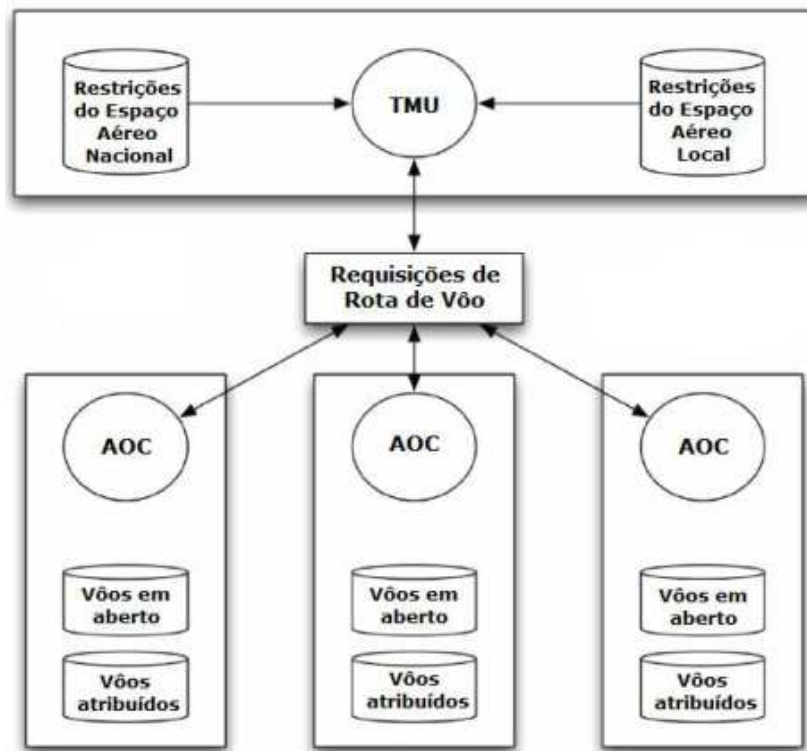


Figura 4.2: Arquitetura dos agentes TMU e AOC. Fonte: Wolfe *et al.* (2009)

A Figura 4.2 apresenta a arquitetura proposta por Wolfe *et al.* (2009).

Para a análise de resultados sobre a execução do conceito CATFM, os autores criaram diferentes cenários. O maior desafio verificado foi o de projetar um sistema que recompensa onde os comportamentos levam a um desempenho global desejado.

4.1.6 Abordagem em Airport CDM

Norin (2008) pesquisou um modelo de sincronização do fluxo de caminhões para remoção de gelo e neve do corpo de aeronaves em um aeroporto. Segundo sua pesquisa, este processo envolve todas as atividades que afetam a aeronave enquanto esta estiver no solo, contando com quase todos os atores que operam no aeroporto, passando pela área de manobras e os pátios, pelo terminal de cargas e passageiros, até a torre de controle do aeroporto. Neste trabalho são elencadas as responsabilidades dos principais agentes do processo: o órgão de controle, as companhias aéreas e o aeroporto.

Os principais intervenientes do processo são apresentados na Figura 4.3.

O modelo de Norin (2008) busca por soluções para o planejamento e escalonamento de caminhões de degelo (*de-icing trucks*), associando sua solução com o problema de roteamento de veículo (*vehicle routing problem – VRP*) com limitação de tempo para execução VRPTW (*VRP with time window*). O problema VRPTW consiste em projetar

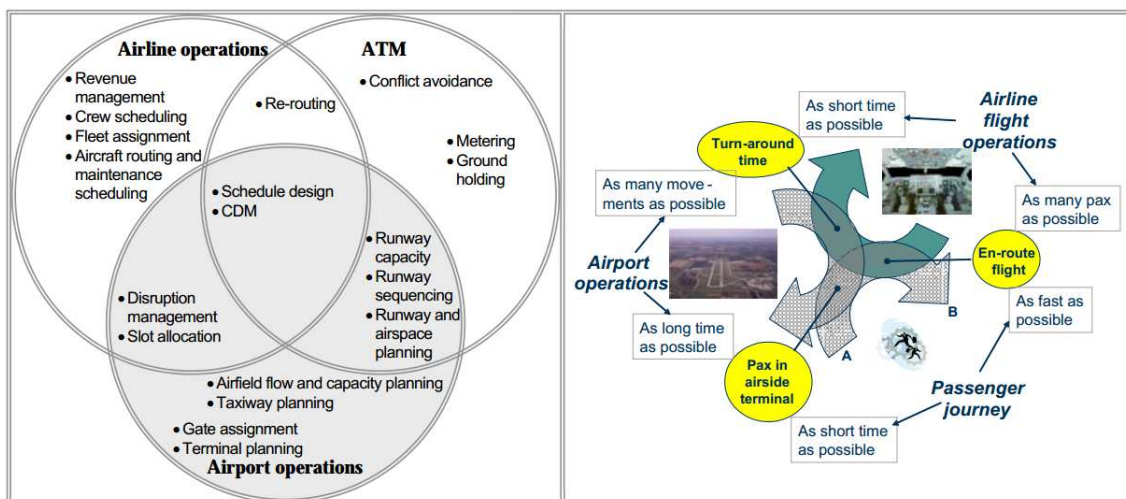


Figura 4.3: Objetivos e desafios dos principais intervenientes do CDM. Fonte original em inglês: Norin (2008)

rotas de menor custo entre pontos geograficamente dispersos. Além disso, o modelo também é composto por definições para frotas de caminhões heterogêneas, em termos de capacidade, custos fixos e variáveis. Neste caso, seus esforços são para resolver problemas de roteamento de veículos de frota heterogênea (*heterogeneous fleet vehicle routing problem* – HVRP).

4.2 Pesquisas e Aplicação em Teoria de *Matching*

Apesar de existirem diversas abordagens propondo diversas soluções, que vão desde programação inteira a sistemas multi-agentes, as pesquisas de Ball *et al.* (2001), Ball *et al.* (2005) e Wolfe *et al.* (2009) indicam que existe, já há algum tempo, a tendência em se utilizar modelos de otimização baseados na Teoria dos Jogos, para análise de procedimentos CDM na área de gerenciamento de tráfego aéreo.

Em relação à trabalhos que utilizam a teoria de *matching* no problema de alocação de *slots* utilizando pagamentos laterais associados à trocas complexas, foi verificado que: Rassenti *et al.* (1982) criaram um mecanismo de leilão combinatorial para *slots* de aeroportos; Ball *et al.* (2005) retomaram o estudo, análise de objetivos e questões referentes à leilões em problemas da aviação; Vossen e Ball (2006a) modelaram um novo *framework* de intercâmbio utilizando o *Compression* com trocas *singleton*; Vossen e Ball (2006b) criaram a formalização de trocas mais complexas envolvendo conjuntos de *slots*; e Balakrishnan (2007) publicou duas abordagens com base em modelos de mercados utilizando mecanismos *Top Trading Cycle* (TTC) e de precificação *Vickrey-Clarke-Groves* (VCG).

Esses trabalhos, apesar de inovadores, apresentaram um significativo contraste entre a proposta e as técnicas que estão atualmente em uso no gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo. Um processo que utilize transferências monetárias entre as companhias aéreas, durante uma alocação de *slots*, é considerado uma mudança significativa do paradigma atual. Para determinar a aceitabilidade desses modelos, é necessária uma análise mais detalhada da definição das políticas de troca, bem como, levar os órgãos de regulamentação de tráfego e os demais participantes do CDM a terem uma nova perspectiva do processo (Schummer e Rakesh, 2013).

Complementando os conceitos utilizados nos trabalhos citados, o tratamento de alguns fatores dos algoritmos baseados em teoria dos jogos, como complexidade de espaço e tempo, tem sido abordado em uma nova área chamada de *teoria dos jogos algorítmica* (Nisan *et al.*, 2007). Neste domínio de conhecimento busca-se garantir que resultados, além de satisfatórios, sejam computacionalmente viáveis.

Seguindo essa tendência, o mecanismo baseado na teoria de matching que atualmente melhor se aplicada à problemática dos programas de espera em solo (GDP) foi conceituado somente com base no algoritmo *Top Trading Cycle* (TTC), proposto por Shapley e Scarf (1974). Este mecanismo, aplicado à mercados de um lado, já foi definido por modelos orientados à aeronaves e orientados à companhias aéreas (Balakrishnan, 2007; Schummer e Rakesh, 2013).

No modelo proposto por Balakrishnan (2007), ao definir os agentes como *aeronaves* individuais, o autor limitou a solução à atender objetivos específicos de cada voo, sem levar em conta as decisões estratégicas de cada companhia aérea. Já o modelo proposto por Schummer e Rakesh (2013) definiu os agentes como *companhias aéreas*, tratando a realocação de *slots* entre suas aeronaves e expandindo o conceito de “propriedade” do CDM. Apesar da inovação, o trabalho ainda aborda mercados de um lado, onde apenas os interesses dos órgãos de controle de tráfego (ATC) e das companhias aéreas são previstos em sua arquitetura.

4.2.1 Modelo TTC-Balakrishnan

O trabalho de Balakrishnan (2007) apresentou duas abordagens diferentes com base em modelos de mercados para resolver a questão de realocação de *slots* de pouso de um aeroporto.

Baseando-se nos dois procedimentos introduzidos pelo programa CDM, o *Ration-By-Schedule* (RBS) e *Compression*, o modelo proposto permitiu às companhias aéreas a liberdade de atribuir prioridades mais gerais e preferências de *slots* (por exemplo, com base em suas estratégias *banking*), tratando os incentivos das companhias aéreas em relação à

possibilidade de manipulação de resultados na informação de atrasos e cancelamentos de seus voos.

Nesse trabalho foram avaliadas várias propriedades destas técnicas através de duas abordagens:

- Na primeira abordagem foi analisado o problema da troca de *slots* sem pagamentos monetários, onde foi mostrada a existência de alocações estáveis no resultado do modelo.
- Na segunda abordagem, foi proposto um método baseado em leilão para trocas com pagamentos laterais entre as companhias aéreas.

O primeiro mecanismo considera uma solução baseada no mecanismo *Top Trading Cycle* (TTC) para alocação de casas, adaptado de Abdulkadiroğlu e Sönmez (1999). O funcionamento do mecanismo necessita que as companhias aéreas declarem as prioridades relativas de seus voos e a ordem de classificação de preferências de *slot* para cada voo.

Segue abaixo uma simplificação do algoritmo TTC proposta pelo autor, para determinar a alocação no núcleo, se ela existir.

- É fixada uma ordenação prioritária dos voos das companhias aéreas no GDP.
- O algoritmo recebe como entrada o conjunto de todos os voos e todos os *slots*, e sequencialmente aloca *slots* a voos como segue:
- Cada voo f aponta para seu *slot* mais preferido entre os *slots* restantes baseado em suas preferências, cada *slot* ocupado aponta para seu ocupante, e cada *slot* vago aponta para o voo com a prioridade mais alta entre aqueles que ainda restam. Uma vez que o número de voos e o número de *slots* são finitos, existe, pelo menos, um ciclo. Cada voo no ciclo é alocado ao *slot* que ele aponta e é removido juntamente com a sua alocação. Se houver pelo menos um voo restante e um *slot* remanescente, o processo é repetido.

O algoritmo TTC termina em, no máximo, $\min\{|F|, |S|\}$ iterações, onde F é o conjunto de voos e S é o conjunto de *slots*. Para qualquer ordenação de voos, o mecanismo induzido TTC é Pareto-eficiente (Roth e Postlewaite, 1977), individualmente racional, e à prova de estratégia (Roth, 1982). Mas essa relação vale quando o modelo possui companhias aéreas com apenas um voo, onde o contrário pode levar a situação onde não existam resultados estáveis, ou seja, o núcleo é vazio.

Para resolver esse problema e estender a regra para múltiplos voos, um conjunto extensivo de restrições sobre as relações de preferência das companhias aéreas foi imposto

ao modelo. Mesmo assim, se o núcleo ainda fosse vazio, o órgão de controle de tráfego aéreo ainda teria que implementar regras para garantir a convergência do mercado do modelo, impondo estabilidade e impedindo a formação de coalizões pelas companhias aéreas.

A segunda abordagem proposta é composta por um mecanismo que permite transferências monetárias entre as companhias aéreas para negociação através de um “leilão de slots”. No modelo proposto, as companhias aéreas relatam o conjunto de trocas aceitáveis e a utilidade associada de cada troca, oferecendo lances pelos *slots*.

O modelo de pagamentos proposto utiliza mecanismos de precificação *Vickrey-Clarke-Groves* (VCG) aproximados em combinação com uma abordagem baseada em otimização para o mercado. A arquitetura do modelo foi definida utilizando a FAA como mediadora do mercado, onde a alocação de *slots*, representada pelo vencedor do leilão, é determinada pela maximização de valor proposto (Vossen e Ball, 2006a).

Com uma estrutura baseada em Parkes *et al.* (2001), foi desenvolvido um sistema de pagamento que é individualmente racional e com orçamento equilibrado, buscando minimizar a capacidade das companhias aéreas manipularem os pagamentos e determinando uma alocação Pareto-eficiente correspondente as utilidades declaradas.

O trabalho de Balakrishnan, apesar de inovador, apresentou um significativo contraste entre a proposta e as técnicas que estão atualmente em uso no ATFM. A proposta com transferências monetárias entre as companhias aéreas durante uma alocação de *slots* é considerada uma mudança significativa do paradigma atual, e requer uma análise detalhada da política e uma nova perspectiva dos participantes do CDM, para determinar a aceitabilidade do modelo.

O problema da não existência de uma alocação estável foi abordado pelo autor com várias restrições, obrigando as companhias aéreas a estender suas preferências sobre toda a frota, para garantir a existência de uma alocação no núcleo através de uma ordenação lexicográfica. O trabalho também deixou alguns pontos incompletos, como a necessidade de um extenso estudo empírico das propriedades compatíveis com incentivo do mecanismo de pagamentos Vickrey para o leilão de *slots*. Do ponto de vista da satisfação dos participantes da tomada de decisão colaborativa, apenas as companhias aéreas podem informar suas preferências.

4.2.2 Modelo TTC-Schummer-Vohra

Em seu trabalho, Schummer e Rakesh (2013) publicaram uma solução contendo uma abordagem de teoria dos jogos baseada em companhias aéreas. Esse trabalho define novas propostas sobre teoria de matching para o problema da espera em solo.

A primeira contribuição deste trabalho foi a formalização e análise de atributos como o incentivo que as companhias aéreas têm para enviar informação de atraso e cancelamento de em seus voos de forma tempestiva.

Em segundo lugar, foi proposto um mecanismo que satisfaz alguns dos atributos formalizados, chamado *TradeCycle*. Esse mecanismo é uma generalização do *Top Trading Cycle* (TTC) de Shapley e Scarf (1974), que já apareceu em modelos relacionados, porém distintos, como Pápai (2000) e Abdulkadiroğlu e Sönmez (1999). Como os mecanismos possuem diferenças significativas, o novo algoritmo recebeu uma nova análise por parte dos autores.

Em último lugar, foi formalizado um novo atributo de incentivo segundo a teoria de *matching*, motivando as companhias aéreas a liberar imediatamente qualquer *slot* que se torne não utilizável por essa companhia.

O novo mecanismo *TradeCycle*, apesar de baseado em variantes do TTC como o proposto por Balakrishnan (2007), possui uma modelagem diferente. Na modelagem de Schummer e Vohra, as companhias aéreas são as participantes do mercado responsáveis por tomar decisões estratégicas, e não as aeronaves.

Nesse trabalho, os autores mostraram que o algoritmo *Compression* da FAA não consegue garantir o conceito de direitos de propriedade de *slots* para as companhias aéreas. Segundo eles, como este fato foi a motivação para a introdução do *Compression* há mais de uma década atrás, existe a necessidade de uma nova solução.

Eles também mostram que os mecanismos existentes ainda não são imunes à manipulação pelas companhias aéreas, onde elas podem evitar informar situações de cancelamentos, possibilitando a retenção de *slots* de pouso que elas não podem usar.

Para concluir, foi mostrado que o algoritmo *Compression* nem sempre obtém resultados estáveis e, portanto, satisfatórios (no núcleo do jogo). Segundo Schummer e Rakesh (2013), o algoritmo proposto por eles resolve este problema, provando que a teoria de *matching* é uma alternativa viável de solução para o problema de espera em solo com base no CDM.

4.3 A Teoria dos Jogos e o CDM no Brasil

No Brasil, as pesquisas sobre CDM relacionadas às soluções baseadas em teoria dos jogos ainda é incipiente, apresentando poucas pesquisas relacionadas à área.

Nos anos mais recentes, Cruciol *et al.* (2013) publicaram um trabalho relacionado com gerenciamento de aeronaves em solo e no ar, controle de atrasos em solo e análise de complexidade dos setores aéreos, com o objetivo de otimizar os processos clássicos já existentes no ATFM. Neste mesmo ano, Ribeiro e Weigang (2013) utilizaram uma solução

baseada na Teoria dos Jogos e um modelo utilizando o protocolo de Rubinstein, para o gerenciamento de aeronaves em operações de decolagem em aeroportos, através de um sistema de apoio à decisão chamado *Collaborative Departure Management* (CoDMAN), desenvolvido sob a filosofia Airport CDM.

Outro modelo, proposto por Arruda Jr *et al.* (2014), procurou expandir os limites da *Collaborative Decision Making* clássica (CDM) através da inclusão de um novo jogador no processo de tomada de decisão: os gestores dos aeroportos. Este trabalho utilizou a teoria de *matching* para resolver o problema de alocações de recursos envolvendo cenários multiagentes. Na arquitetura proposta, as decisões colaborativas dos jogadores são focadas nas preferências de alocações dos gestores dos aeroportos e das companhias aéreas. Este trabalho apresentou um método também eficiente para sequenciamento de decolagens para aeronaves em espera em solo, concentrando-se em decisões voltadas à *Ground Delay Programs*. A modelagem estabeleceu um mercado de *slots* entre os agentes citados, onde o agente ATC tem papel central de estabelecimento de restrições de segurança no cenário aéreo.

Ainda na linha de tratamento multiobjetivo entre diversos intervenientes do cenário de tráfego aéreo, Almeida *et al.* (2014) utilizou a Teoria dos Jogos *Satisficing* para estabelecer critérios de rejeitabilidade e seletibilidade nas decisões envolvendo gestores de aeroportos, companhias aéreas e gestores ATC. O novo modelo permitiu estabelecer o impacto causado em cada entidade. Como principal contribuição, este trabalho foi projetado de forma a permitir seu alinhamento com outras soluções para otimização de entidades do cenário aéreo.

4.4 Resumo do Capítulo

Este Capítulo apresentou um resumo do estado da arte para CDM. Nesse caso foram descritas as principais pesquisas aplicadas em soluções para o gerenciamento de tráfego aéreo. Na área de Inteligência Artificial foram abordados trabalhos baseados em programação inteira e em sistemas multiagentes, com foco em aeroportos, em fixos e em aeronaves. Quanto à pesquisas e aplicações em teoria de *matching*, foram abordadas as propostas relevantes nessa área, com especial ênfase em soluções que utilizam mercados de um lado, os modelos TTC-Balakrishnan e TTC-Schummer-Vohra. Após, foram apresentados alguns trabalhos que utilizam a teoria dos jogos para o CDM no Brasil.

A Tabela 4.1 apresenta de uma forma evolutiva os principais trabalhos já publicados na área. Podemos perceber que desde o início dos anos 1980 as pesquisas na área de gerenciamento do tráfego aéreo têm sido remodeladas.

Tabela 4.1: Tabela de trabalhos publicados em CDM

Ano	Assunto	Autores
1982	Mecanismo de leilão combinatorial para <i>slots</i> de aeroportos	(Rassenti <i>et al.</i> , 1982)
1987	Caso estocástico para um único aeroporto	(Andreatta e Romanin-Jacur, 1987)
1987	Demanda/Capacidade do aeroporto consideradas determinísticas	(Odoni, 1987)
1997	Tratamento de aeroportos estratégicos <i>banking constraints</i>	(Hoffman, 1997)
1998	Extensão de capacidades em rotas do cenário aéreo	(Bertsimas e Stock-Paterson, 1998)
1998	Capacidades de chegada consideradas estocásticas	(Ball e Hoffman, 1998)
2001	Análise de objetivos e questões referentes à leilões em problemas da aviação	(Ball <i>et al.</i> , 2001)
2006	Modelo de <i>framework</i> de intercâmbio utilizando o <i>Compression</i> com trocas <i>singleton</i>	(Vossen e Ball, 2006a)
2006	Formalização de trocas complexas envolvendo conjuntos de <i>slots</i>	(Vossen e Ball, 2006b)
2007	Abordagens com base em modelos de mercados utilizando mecanismos <i>Top Trading Cycle</i> (TTC) e de precificação <i>Vickrey-Clarke-Groves</i> (VCG)	(Balakrishnan, 2007)
2007	Modelo de previsão combinando atrasos em solo e no ar	(Lulli e Odoni, 2007)
2007	Abordagens gerais na área de teoria dos jogos algorítmica	(Nisan <i>et al.</i> , 2007)
2008	Sincronização do fluxo de caminhões para remoção de gelo e neve do corpo de aeronaves em um aeroporto - ACDM (<i>Airport CDM</i>)	(Norin, 2008)
2008	Arquiteturas para coordenação de agentes inteligentes em AFTM	(Tumer e Agogino, 2008)
2009	Tratamento de impacto dos atrasos aos passageiros e tripulação da aeronave - CATFM (<i>Collaborative ATFM</i>)	(Wolfe <i>et al.</i> , 2009)
2013	Gerenciamento de aeronaves em solo e no ar, controle de atrasos em solo e análise de complexidade dos setores aéreos	(Cruciol <i>et al.</i> , 2013)
2013	Solução baseada na teoria dos jogos para o gerenciamento de aeronaves em operações de decolagem em aeroportos (<i>Collaborative Departure Management</i> (CoDMAN))	(Ribeiro e Weigang, 2013)
2013	Mecanismo aplicado à mercados de um lado orientado à companhias aéreas	(Schummer e Rakesh, 2013)
2014	Tomada de decisão colaborativa utilizando Teoria dos Jogos <i>Satisficing</i>	(Almeida <i>et al.</i> , 2014)

Uma característica comum a essas abordagens é que elas buscam encontrar alocações baseadas no custo dos atraso em solo e/ou nos atrasos no ar seguindo um paradigma de planejamento central. Entretanto, nota-se que as soluções ótimas encontradas para os processos foram desenvolvidas sem considerar o impacto sobre todos os intervenientes

relevantes. Atualmente, os interesses de passageiros, aeroportos, pilotos, tripulação das aeronaves, entre outros, não são levadas em consideração no processo CDM clássico.

Em resumo, neste capítulo foram apresentadas soluções que mostram as tendências da pesquisa atual para diferentes problemas nos processos ATM. Desde modelos de programação inteira aos sistemas multiagentes, diversos estudos propõem soluções aos gerentes de tráfego, operadores de partidas e chegadas, passageiros e tripulação de voo. Apesar da eficiência e inquestionável contribuição desses trabalhos, nenhuma pesquisa atual utilizou a teoria de *matching* e mecanismos de mercados de dois lados para o problema de alocação de *slots*.

O próximo Capítulo apresenta o modelo proposto nesta Tese. Em problemas de alocação de recursos que envolvem mais de um agente, é esperado uma abordagem que respeite as preferências de todos os jogadores, levando o processo de *matching* a encontrar resultados ótimos/estáveis.

Capítulo 5

Modelo de Mercado de *Slots*

Uma vez que as pistas de um aeroporto podem ser consideradas recursos limitados da infraestrutura aeronáutica e aeroportuária, possuindo oferta e demanda por sua utilização, os modelos de mercados de *matching* de dois lados podem ser associados a processos do gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. Logo, o processo de alocação de *slots*, seja para operações de decolagem ou pouso, pode ser modelado como um “mercado”.

Apesar da associação ser intuitiva, até o momento poucos trabalhos apresentaram soluções que exploram o potencial dessa teoria no contexto do ATFM (Balakrishnan, 2007; Schummer e Rakesh, 2013). Mesmo assim, tais trabalhos não exploraram a possibilidade de se utilizar processos CDM e a abordagem de mercado de dois lados.

O modelo proposto neste trabalho é baseado na filosofia do CDM clássico, onde a troca de informações realizada entre todos os envolvidos no processo possibilita melhor embasamento para tomada de decisões, e no mercado de *matching* de dois lados, que permite a entrada de mais um jogador no processo de alocação de *slots*.

Neste capítulo serão apresentadas as definições necessárias ao *mercado de slots* utilizado pelo modelo DA-SLOT. Além disso, serão discutidos alguns conceitos chave desse mercado, como elementos alocáveis e elementos tomadores de decisão. Inicialmente será dada uma visão geral integrada de todo o processo de alocação.

5.1 Visão Geral

O programa de espera em solo (GDP) possui tarefas fundamentais e características pré-definidas entre os participantes do processo. Entre essas tarefas, temos: (a) a criação de um novo cronograma ajustado por restrições de capacidade operacional; (b) o tratamento de voos cancelados; (c) a definição de ordem das aeronaves no novo cronograma; (d) entre outros (ver Seção 3.3). Como exemplos de características podem ser citados o tratamento

de priorização de aeronaves ou aeroportos, exclusão de rotas, a possibilidade de alocações baseadas em preferências das companhias aéreas, etc.

Além disso, um GDP depende fortemente do conceito de tomada de decisão colaborativa (CDM), onde a tempestividade e o correto compartilhamento de informações são de vital importância para o sucesso na tomada de decisões entre os intervenientes (Butler, 1998). Logo, o processo todo foi dividido em fases, onde cada fase possui objetivos muito bem definidos.

O modelo DA-SLOT possui estrutura semelhante ao CDM, onde o processo de alocação utiliza uma variação do mecanismo de alocação criado por Gale e Shapley (1962), que ficou conhecido como *Deferred Acceptance*. A escolha deste mecanismo é justificada pela sua maturidade na solução de problemas práticos desde os anos 1950, e em sua ampla utilização em cenários críticos e complexos, que envolvem restrições que vão desde problemas de localidade até compatibilidade entre doadores de órgãos (Roth e Peranson, 1999; Roth *et al.*, 2004).

A Figura 5.1 apresenta uma visão geral da solução proposta.

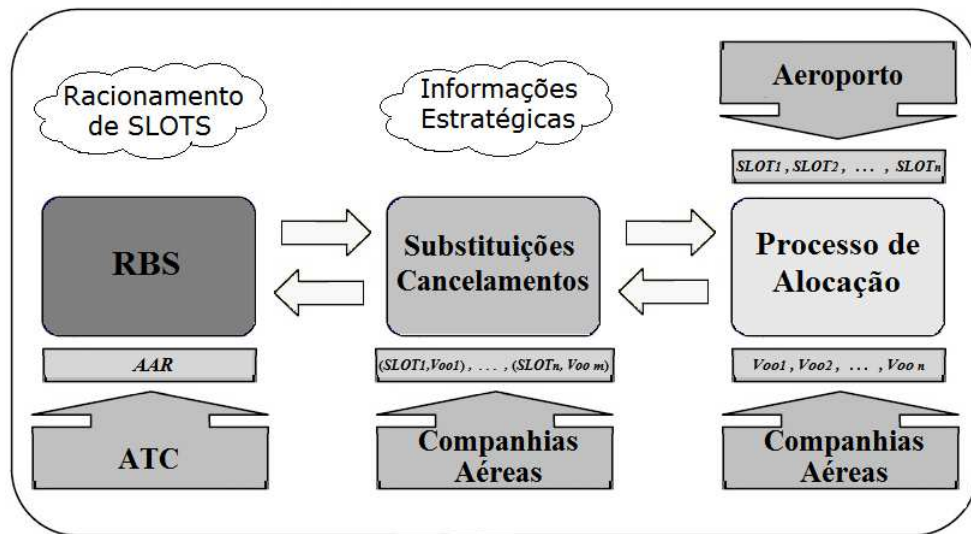


Figura 5.1: DA-SLOT – Mercado de *slots*

Nessa nova estrutura, o ATC representa o órgão de controle de tráfego aéreo (ATC) centralizador do mercado, recebendo informações fornecidas: pelas companhias aéreas a respeito de seus voos; e do aeroporto, em relação ao cronograma e preferências de utilização sobre os *slots*. Cabe a ele definir a nova taxa de chegada (AAR) para o aeroporto afetado pelo GDP.

As duas primeiras partes do processo foram modeladas através da utilização das etapas *Ration-By-Schedule* e *Substituições/Cancelamentos* do CDM.

A reutilização da primeira etapa justifica-se pela necessidade obrigatória da construção de um novo cronograma de *slots*, com base nas restrições de capacidade operacional de chegada impostas ao aeroporto (AAR). Esse processo possui características fundamentais de “justiça” da filosofia CDM onde a porcentagem de *slots* de cada companhia aérea participante do GDP permanece igual à porcentagem que ela tinha no cronograma original de voos (Butler, 1998). Além disso, ele mantém a ordem dos voos conforme o cronograma original publicado (Butler, 1998).

A segunda etapa permite que as companhias aéreas realizem substituições e/ou cancelamentos sobre seus voos. Isso preserva o conceito de “propriedade” de *slots*, permitindo a liberdade das companhias aéreas realizarem alterações internas entre os *slots* alocados para seus voos, de forma a maximizar as decisões estratégicas de cada uma.

Finalmente, a terceira etapa corresponde ao mercado de *slots* propriamente dito. É nesse momento que ocorre o processo de alocação entre aeronaves e *slots*. Nesta etapa o gestor dos aeroporto define suas preferências de alocação dos *slots* sobre as aeronaves, e as companhias aéreas definem as preferências das aeronaves sobre os *slots*. Cabe aos algoritmos definidos no DA-SLOT realizarem a realocação entre esses recursos.

Apesar do termo *alocação* representar o cronograma original de voos, e o termo *re-alocação* o cronograma ajustado, para efeito de simplicidade, neste trabalho, ambos os termos referem-se ao processo de ajustar os voos aos *slots* da pista de um aeroporto, quando necessário.

5.2 Jogadores

As companhias aéreas são os jogadores clássicos do CDM, pois elas controlam os voos que serão alocados em cada *slot*. O gestor do aeroporto, por sua vez, representa o detentor da infraestrutura disponível, onde os *slots* estão distribuídos sobre suas pistas. Portanto, para o mercado de *slots*, os jogadores foram definidos como as companhias aéreas e o gestor do aeroporto:

- *Companhias Aéreas*: são responsáveis pela definição das preferências estratégicas de cada um de seus voos; e
- *Aeroporto*: é responsável pela definição de preferências de alocação para cada um dos *slots* disponíveis.

Apesar de não ser considerado um jogador, o controle de tráfego aéreo (ATC) afeta a estrutura de alocação através da definição de restrições de capacidade operacional. Portanto, ele pode ser visto como uma entidade *normalizadora/centralizadora* deste mercado, não participando da criação das listas de preferências para os voos e os *slots* do mercado.

É importante notar que, apesar de alguns jogadores poderem ser representados naturalmente pelas aeronaves, neste trabalho eles foram modelados como companhias aéreas, pois são estas que detêm o poder de decisão estratégica sobre seus voos (Schummer e Rakesh, 2013).

As aeronaves e os *slots* são tratados como recursos no modelo de mercado apresentado, sendo chamados no DA-SLOT de *elementos alocáveis*. Já as companhias aéreas e o aeroporto, por possuírem objetivos estratégicos sobre esses recursos, serão chamados de *elementos tomadores de decisão*.

Portanto, as aeronaves e os *slots* não são considerados jogadores no mercado. Essa distinção faz-se importante por definir qual é o papel de cada elemento no modelo.

5.3 Modelagem do Mercado de *Slots*

Uma vez que o GDP pode ser visto como um problema de alocação de recursos, o ambiente pode ser caracterizado como um “mercado de *slots*” onde existem dois conjuntos, representando um grupo de voos de um lado e um grupo de *slots* do outro lado. O objetivo na solução deste mercado pelo modelo *DA-SLOT* é associar cada voo a cada *slot*, através de um relacionamento “um-para-um”, respeitando-se as preferências de alocação de cada um. Essa abordagem garante um *matching* estável para todos os participantes.

Definição 1 – Mercado de Slots – Um mercado de *slots* com relacionamentos um-para-um é formado por $\langle F, S, \succ_F, \succ_S \rangle$, com F e S como conjuntos finitos e disjuntos de elementos alocáveis, onde F representa os voos f_1, f_2, \dots, f_m , onde m é o número de voos no período considerado, e S representa os *slots* disponíveis neste mercado como s_1, s_2, \dots, s_n onde n é igual o número de *slots* no período considerado. Os elementos do conjunto de *slots* de chegada $S = 1, 2, 3, \dots, |S|$ podem ser interpretados como representações ordinais de tempo: para $s, v \in S$, $s < v$ significa um *slot* s possui um tempo menor que o *slot* v .

Definição 2 – Menor Horário de Chegada Possível – O menor horário de chegada possível (*Earliest Possible Arrival Time* - EPAT) para um voo $f \in F$ é representado por $e_f \in S$. Desta forma, um voo f deve ser associado ao *slot* $s_i \in S$ somente se $e_f \leq s_i$. Em outras palavras, um voo nunca poderá pousar em um horário menor do que seu EPAT.

Definição 3 – Listas de Preferências Ordenadas – Cada voo f_j , com $j = 1, \dots, |F|$, possui preferências \succ_F estritas, completas e transitivas³ sobre os elementos do outro conjunto. O mesmo vale para as preferências dos *slots*, \succ_S .

Definição 4 – Preferências de Alocação – As listas individuais que contém as preferências de alocação são representadas como um conjunto $P(f) = s_2 \succ s_1 \succ s_3 \succ \dots \succ s_n$ que significa que o voo f prefere estritamente ser alocado ao *slot* s_2 que ao *slot* s_1 , e assim por diante. As preferências de alocação são definidas pelos jogadores tomadores de decisão utilizando nas Equações (6.1) e (6.3), onde as companhias aéreas são responsáveis pelas preferências \succ_F sobre os voos f e o gestor do aeroporto afetado pelo GDP é responsável pelas preferências \succ_S sobre os *slots* s .

Definição 5 – Matching – Um *matching* é o resultado desse mercado, formado por pares de elementos de um conjunto com os elementos do outro conjunto através de uma correspondência um-para-um dos conjuntos $F \cup S$. O *matching* é representado pela função $\mu : F \cup S \rightarrow F \cup S$ de tal forma que $\mu(f) = s \Leftrightarrow \mu(s) = f, \forall f \in F, s \in S$.

Definição 6 – Pares Bloqueadores – Um *par bloqueador* é formado pelo par $(f, s) \in F \times S$ se ambos preferem um ao outro ao invés de seus pares formados no *matching* μ , isto é, $s \succ_F \mu(f), f \succ_s \mu(s)$.

Definição 7 – Matching Individualmente Racional – O *matching* μ é individualmente racional se cada jogador é considerado aceitável pelo seu par. Isto é, um *matching* é considerado individualmente racional se ele não é bloqueado individualmente por nenhum jogador.

Definição 8 – Matching Estável – Uma *matching* é estável se ele apresenta uma alocação ótima para todos os elementos do mercado, sem a existência de pares bloqueadores.

³Se o conjunto de preferências de um jogador é *completo* e *transitivo*, ele é considerado um jogador *racional*. Mais informações na Seção 2.3

5.4 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou a modelagem da proposta deste trabalho, chamada DA-SLOT, a qual utiliza o mecanismo de *matching* para mercado de dois lados para resolver o problema da alocação de *slots*.

No decorrer do capítulo foram apresentados os jogadores desse mercado, na figura das companhias aéreas e do gestor do aeroporto, seus principais objetivos e as definições de características dos *elementos alocáveis* e dos *tomadores de decisão*.

A formalização do mercado de *slots* foi feita de forma a gerar um arcabouço matemático para as avaliações, provas e conclusões dos capítulos posteriores.

No próximo capítulo será apresentada uma visão mais geral da estrutura do modelo, bem como, a implementação dos algoritmos e funções de *payoff* dos jogadores.

Capítulo 6

Arquitetura e Implementação

Neste capítulo serão apresentadas a arquitetura e informações necessárias à implementação do modelo DA-SLOT.

Inicialmente será dada uma visão geral do modelo, da integração das entidades e das tarefas de cada processo executado por um módulo específico. Em seguida será apresentada a definição da estrutura de *payoff* dos jogadores do mercado, e dos algoritmos responsáveis por realizar a alocação das aeronaves e *slots*.

Essas informações serão utilizadas em capítulos posteriores, nos estudos de caso, validação e comparação da solução proposta ao problema de alocação de *slots* do CDM.

6.1 Ambiente

O ambiente do modelo DA-SLOT é baseado no processo de alocação de *slots* e necessita de alguns elementos essenciais à execução de um programa de espera em solo (GDP). Para permitir a realização de um GDP, o modelo utiliza informações normalmente disponíveis no CDM, como:

- a demanda de aeronaves, através dos planos de voo repetitivos e eventuais;
- os aeroportos de origem e destino do cenário aéreo;
- as pistas de decolagem/pouso presentes nos aeroportos;
- o cronograma de *slots* de cada pista;
- os voos que serão alocados em cada *slot*;
- as companhias aéreas a qual pertencem esses voos;
- a capacidade operacional de cada aeroporto, definida como AAR (aeronaves/ hora).

Algumas dessas informações são fornecidas por sistemas ATM já existentes, como o SYNCROMAX e o STVD (Timoszczuk *et al.*, 2009). Outras informações são enviadas ao modelo de forma estratégica ou tática, por entidades do próprio cenário aéreo. Desta forma é necessário a definição de entidades, relacionamentos, objetivos e integração entre os diversos elementos desse cenário.

6.2 Entidades

Ao executar um programa de espera em solo (GDP) através do modelo DA-SLOT, algumas entidades participam ativamente do processo de alocação.

Nesta estrutura, a *entidade ATC* executa o papel fundamental de definir qual aeroporto, qual a nova taxa de chegada (AAR), qual a janela de tempo de duração do GDP, e quais aeronaves serão afetadas no processo. No Brasil, esse trabalho fundamental é realizado pelo Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA).

As outras duas entidades foram definidas com base nos estudos realizados por Norin (2008) sobre os principais intervenientes do gerenciamento do tráfego aéreo (ATM). Nesse trabalho fica explícita a importância do ATC e das companhias aéreas como participantes ativos da filosofia CDM, e também do gestor do aeroporto em diversos processos ATM, inclusive no GDP.

No modelo DA-SLOT, as principais entidades são:

- *ATC*: pode ser caracterizado por uma única *entidade centralizadora*, responsável pela gerenciamento do cenário aéreo, pela identificação de possíveis pontos de congestionamento, e pela aplicação de medidas restritivas de espera em solo aos aeroportos;
- *Companhia Aérea*: é representada por várias entidades *tomadoras de decisão*, cujo papel é controlar suas aeronaves quanto aos horários previstos de decolagem e pouso, informando possíveis mudanças de horário devido a problemas operacionais, técnicos e/ou mecânicos, ou cancelamentos que possam alterar o cronograma original dos voos;
- *Aeroportos*: entidades *tomadoras de decisão* responsáveis por coordenar os movimentos de alocação dos *slots* em suas pistas, conforme a capacidade operacional definida pelo *ATC*.

Por *entidade centralizadora* entende-se um elemento do cenário aéreo com capacidade estratégica e tática, que deve conhecer todas as informações relevantes ao cumprimento

de seus objetivos, e fazer a integração dessas informações e quaisquer recursos necessários aos demais elementos, de forma que estes também possam cumprir seus objetivos.

O termo *tomadores de decisão* foi utilizado para designar elementos que realizam ações sobre outros elementos com poder de decisão reduzido ou mesmo que não tomam qualquer decisão, como o caso das aeronaves e *slots*, respectivamente, de forma a alterar o cenário vigente. Na modelagem do *mercado de slots*, os elementos tomadores de decisão foram representados pelos jogadores companhias aéreas e aeroportos. Enquanto que as aeronaves e *slots* foram designados como *elementos alocáveis* do mercado.

A Figura 6.1 apresenta uma visão geral das principais entidades, elementos de entrada de informação e módulos de processamento.

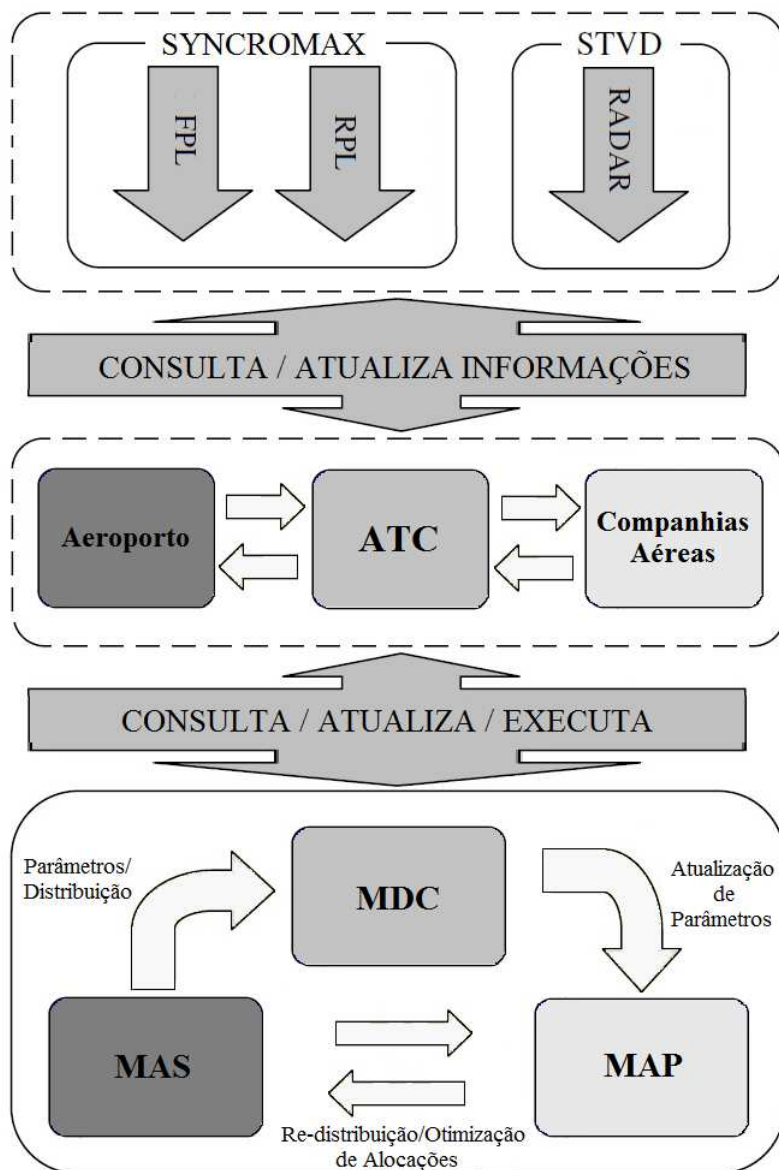


Figura 6.1: Integração dos diversos intervenientes do DA-SLOT

Na estrutura proposta, a camada superior é responsável por controlar a entrada e saída de informações ao ambiente externo do CDM, a camada intermediária prevê a troca de informação entre as entidades do modelo, e a camada inferior integra as funções de alocação do GDP de forma modularizada. A etapa do RBS do modelo DA-SLOT (Figura 5.1) executa no módulo MDC, a etapa de Substituições e Cancelamentos no módulo MAP, e a etapa de Alocações no MAS.

Adiante serão apresentadas as informações dessa arquitetura em maior detalhamento.

6.3 Entrada e Saída de Informações

As informações base para a construção dos cronogramas de alocação dos *slots* são fornecidas ao modelo através dois principais sistemas no ATM brasileiro: o SYNCROMAX e o STVD.

Atualmente, esses sistemas são responsáveis por prover todas as informações referentes aos voos existentes no cenário aéreo. Logo, eles podem ser considerados ferramentas estratégicas (SYNCROMAX) e táticas (STVD), de relevante importância para os gerentes de tráfego aéreo no CGNA.

O Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo (SYNCROMAX) possui informações para realizar a projeção de cenários estratégicos. Estas projeções dão visibilidade ao ATC quanto aos possíveis desbalanceamentos futuros entre a demanda e a capacidade de fluxo, permitindo a definição antecipada de quais ações devem ser tomadas (Timoszczuk *et al.*, 2009).

Tais informações são baseadas em dados disponíveis nos Planos de Voo Repetitivos (*Repetitive Plan* – RPL) e Planos de Voo Eventuais (*Filed Flight Plan* – FPL) e permitem ao modelo proposto, a visualização da demanda de voos prevista nos períodos posteriores à ocorrência da aplicação do programa de espera em solo.

Para que o DA-SLOT também possa ser utilizado em nível tático, informações em tempo real devem ser recebidas através do Sistema de Tratamento e Visualização de Dados (STVD). Este modelo é uma ferramenta computacional ATC que permite a visualização dos dados relativos aos planos de voos pré-ativos no modelo (voos prestes a decolar) e a visualização da síntese radar (aeronaves já em voo) (Crespo e Weigang, 2010).

Com na estrutura de informações proposta, o DA-SLOT pode trabalhar com uma visão geral e também detalhada dos movimentos aéreos previstos e existentes do cenário aéreo.

6.4 Objetivos e Ações

Na estrutura proposta, a entidade centralizadora ATC possui interesses de coordenação global do sistema aéreo, manutenção da segurança e fluência dos voos, bem como, o controle de possíveis congestionamentos através de medidas restritivas. Já as ações dos elementos tomadores de decisão são voltadas para a maximização de seus objetivos específicos e individuais. Esses objetivos podem variar, desde o simples aumento da lucratividade até a diminuição de emissão de poluentes, consumo de combustível, entre outros.

No contexto específico do DA-SLOT, as ações das entidades foram mapeadas de forma a possibilitar que os jogadores atinjam seus objetivos, que podem ser individuais ou coletivos. Abaixo segue um detalhamento maior das ações de cada entidade.

- *ATC* é responsável por:
 - receber informações a respeito dos movimentos aéreos vigentes, monitorando ininterruptamente a quantidade presente de aeronaves nos setores do espaço aéreo;
 - detectar congestionamentos de forma antecipada através da previsão de ocupação das aeronaves no cenário, utilizando dados disponíveis nos planos de voo;
 - aplicar o programa de espera em solo (GDP) através da redução da capacidade operacional do(s) aeroporto(s) afetados;
 - acionar o DA-SLOT na aplicação da redistribuição de *slots* entre as aeronaves afetadas.

- *Aeroportos* são responsáveis por:
 - distribuir os *slots* segundo o horário previsto de cada voo;
 - tratar eventualidades que impeçam alguma aeronave de voar, deixando o *slot* vago;
 - redistribuir os *slots* da pista durante a execução de medidas restritivas e baseadas no resultado de alocações do modelo.

- *Companhias Aéreas* são responsáveis por:
 - definir as substituições e cancelamentos de seus voos atrasados por um GDP;
 - informar a situação de cada voo para o ATC.

6.5 Módulos de Alocação

O processo de alocação de *slots* no CDM é executado em três processos distintos (ver Figura 3.3). O modelo DA-SLOT se baseia nesses processos existentes para proceder a alocação das aeronaves.

Os processos de alocação foram definidos para serem executados em três módulos principais: o Módulo de Definição de Cronograma (MDC), o Módulo de Atualização de Parâmetros (MAP) e o Módulo de Alocação de *Slots* (MAS). Esses módulos podem ser visualizados na camada inferior da Figura 6.1.

6.5.1 Sequência de Execução

O procedimento sequencial do modelo DA-SLOT para solução de um GDP é apresentado como segue.

Na primeira etapa, o ATC calcula as restrições de capacidade do aeroporto afetado, definindo sua nova taxa de chegada (AAR). A partir dessa informação, o Algoritmo RBS cria um novo cronograma de *slots* de chegada, adaptando os voos previamente alocados na antiga lista. Esta alocação inicial das aeronaves do modelo é realizada pelo módulo de definição de cronograma (MDC).

Com o novo cenário montado, a etapa de substituições e cancelamentos mantém a liberdade das companhias aéreas poderem tomar decisões estratégicas a respeito de seus voos e seus *slots*, devendo informar tempestivamente qualquer alteração em seus cronogramas ao ATC. Esta etapa pode deixar *slots* vazios no novo cronograma criado. As informações fornecidas pelas companhias aéreas são recebidas pelo ATC e processadas através do módulo de atualização de parâmetros (MAP).

E por fim, a etapa de processamento de alocações é executada através de funções de *payoff* e os algoritmos definidos para o modelo DA-SLOT. Nesta fase, o gestor do aeroporto passa a indicar suas preferências sobre os *slots*, e as companhias aéreas indicam suas preferências sobre seus voos que podem ocupar esses *slots*, limitados ao horário de decolagem (ver estrutura de *payoff* na Seção 6.6). E as realocações são realizadas através do módulo de alocação de *slots* (MAS), utilizando três algoritmos definidos para este modelo (ver Algoritmo 4, Algoritmo 5 e Algoritmo 6).

É importante notar que as informações necessárias à execução do processo podem ser trocadas em todas as etapas, de forma a permitir uma execução cíclica do mesmo. Agora as funcionalidades de cada módulo serão vistas em mais detalhes.

6.5.2 Módulo de Definição de Cronograma

O Módulo de Definição de Cronograma (MDC) foi mapeado como um processo de análise e alocação inicial para as aeronaves que irão operar em determinado dia, sugerindo ao gerente de tráfego informações a respeito dos resultados possíveis, calculados pelo modelo. Entre suas principais funções, destacam-se:

- efetuar o sequenciamento de aeronaves baseado no cronograma original dos voos constante nas informações de RPL e FPL do DA-SLOT, e na capacidade operacional dos aeroportos informada pelo ATC; e
- analisar e tratar os resultados produzidos pelo modelo DA-SLOT, sugerindo ao gerente de tráfego as alocações mais adequadas ao cenário projetado.

6.5.3 Módulo de Atualização de Parâmetros

Após a realização do sequenciamento inicial das aeronaves, o modelo DA-SLOT deverá ser alimentado com informações táticas, referentes à situação atual das aeronaves, através do Módulo de Atualização de Parâmetros (MAP). Os parâmetros desse novo cenário serão enviados para outros módulos da arquitetura, para que seja realizada a projeção de novos sequenciamentos de aeronaves. Este módulo receberá e dará tratamento às informações, quanto a:

- ajustes de capacidade instalada dos aeroportos (AAR), normalmente limitados por medidas restritivas de espera em solo (GDP);
- priorização de voos, aeroportos, setores, entre outros;
- atualização dos planos de voo, quanto à voos atrasados e cancelados; e
- adequação e fornecimento dos dados necessários à execução dos outros módulos, conforme a necessidade do algoritmo de alocação de *slots*.

6.5.4 Módulo de Alocação de *Slots*

Uma vez alterados os parâmetros de funcionamento, a etapa de alocação será realizada pelo modelo através do Módulo de Alocação de *slots* (MAS), utilizando as informações atualizadas pelo MAP. Este módulo é responsável por preencher *slots* vazios, criados à partir de possíveis voos cancelados pela segunda etapa do GDP. O MAS terá as seguintes funções:

- executar múltiplas soluções de algoritmos de alocação de *slots*, de forma a possibilitar uma análise comparativa de resultados pelo MAS;
- permitir a execução de algoritmos baseados em regras e metodologia próprias, sem que o resultado de um interfira no outro; e
- respeitar os resultados da alocação inicial executada pelo MDC, redistribuindo os voos de forma que as novas taxas de decolagem/pouso de aeronaves nos aeroportos não excedam as condições de restrição de capacidade impostas pelo ATC.

É importante notar que inicialmente o modelo DA-SLOT irá trabalhar apenas com uma estrutura de alocação, construída através de três algoritmos (ver Seção 6.7).

Essa estrutura para o DA-SLOT permite que sejam realizadas novas execuções através da atualização dos parâmetros no MAP e, também, a disponibilização dos resultados para análise a ser realizada pelo MDC. Os resultados fornecidos pelo modelo servem como subsídio de apoio a decisão dos gerentes de tráfego.

6.6 Estruturas de *Payoff*

No mercado de alocação de *slots*, os objetivos de cada grupo de jogadores podem ser diferentes e até contraditórios. Para as companhias aéreas, por exemplo, pode ser importante reduzir o atraso total de seus voos, reduzir os custos inerentes a esses atrasos, priorizar voos estratégicos em detrimento de outros, visando a importância diferenciada para passageiros em voos internacionais, ou com escala, etc. Para as concessionárias dos aeroportos, talvez a meta seja a fluência otimizada das aeronaves no pátio, uma taxa saída maior para os passageiros, a priorização de voos já em rota, entre outros.

Nesta proposta, definimos as bases formais da estrutura de *payoff* dos jogadores do modelo DA-SLOT.

A função de *payoff*, ou função utilidade, dos jogadores *Companhia Aerea* é definida na Equação (6.1). A abordagem é baseada em uma estratégia com foco no lucro operacional de cada aeronave pertencente ao conjunto de voos de uma dada companhia aérea. A receita de vendas de uma companhia aérea para um voo f é representada por sr , vc é o custo variável incorrido e fc é o custo fixo por passageiro p , para um total de q passageiros deste mesmo voo.

A função $\alpha(f)$ representa a importância dada ao voo f por sua companhia aérea, sendo um valor x , onde $0 < x \leq 1$. Essa função permite às companhias aéreas priorizar alguns voos em detrimento de outros.

É importante notar também que, nessa estrutura, valores mais altos de $R_F(f)$ indicam voos mais rentáveis para a companhia aérea responsável por f . As variáveis sr , vc , e fc são consideradas já conhecidas pelas companhias aéreas.

$$R_F(f) = \alpha(f) \left[\left(\sum_{k=1}^q sr(p_k) - vc(p_k) \right) - fc(f) \right] \quad (6.1)$$

No estudo da estrutura de *payoff* para o jogador *Aeroporto*, define-se o tempo de atraso da aeronave na Equação (6.2). O horário associado ao *slot* s é definido por $st(s)$, $at(f)$ é o horário estimado de chegada do voo f , e c é uma constante de ajuste.

$$D_S(f) = \theta(st(s) - at(f), c) \quad (6.2)$$

A função $\theta(f)$ processa o resultado da diferença entre os horários do *slot* $st(s)$ e $at(f)$, em minutos (Arruda *et al.*, 2012; Cruciol *et al.*, 2013). Se o resultado é zero ou negativo, indicando que o voo não está atrasado, essa função retorna o valor 1. Se o resultado é positivo, contendo o tempo de atraso em minutos, ele é dividido pela constante de ajuste c , retornando o valor resultante. Por exemplo, se o horário estimado de chegada de um voo, $at(f)$, é 09:30 e o horário do *slot* é 11:00, o valor positivo indica 90 minutos de atraso. Esse valor é dividido por c . Supondo-se que o valor de c seja 30 minutos, a função $\theta(f)$ retorna o valor 3. Se c for 60 minutos, a função retornará a 1,5. Note que quanto maior o valor de c , menor a importância dada ao atraso do voo. Esta abordagem dá um grau de importância ao voo, que pode ser considerado como um peso, para o atraso de cada voo f , representado pelo indexador $D_S(f)$.

A função de *payoff* do jogador *Aeroporto* é mostrada na Equação (6.3), sendo baseada em uma estratégia que prioriza voos de acordo com a quantidade de passageiros. Aqui q é o número total de passageiros do voo f e a função $\beta(f)$ é a importância dada pelo gestor do aeroporto ao voo f , com um valor x , onde $0 < x \leq 1$. O número total de passageiros é afetado pelo atraso $D_S(f)$ do voo f . Essa política permite o descongestionamento do interior dos aeroportos de origem, a fluência do trânsito de pessoas esperadas para o aeroporto de destino, e a redução do *stress* da tripulação e dos passageiros de cada voo.

$$R_S(f) = \beta(f)q^{D_S(f)} \quad (6.3)$$

As estruturas de recompensa apresentadas nas Equações (6.1) e (6.3) permitem definir uma prioridade para as aeronaves afetadas pelo GDP, possibilitando uma ordenação de voos de acordo com as preferências dos jogadores.

Como as funções de *payoff* são baseadas em número de passageiros, entende-se que dando prioridade aos voos com mais passageiros e/ou aos voos mais atrasados, as ins-

talações aeroportuárias, incluindo pistas de taxiamento, vias de transporte de bagagens e portões de embarque, ficarão menos sobrecarregadas. Essa situação irá levar a menos *stress* para cada interveniente afetado pelo processo, por causa de mais espaço, menos confusão nas operações de aterrisagem e decolagem, e processos aeroportuários mais ágeis.

É importante notar também que, de acordo com a estrutura proposta, não existe relação direta entre a prioridade dada ao voo pelo gestor do aeroporto e a prioridade dada ao voo pelas companhias aéreas. A prioridade dada pelo gestor do aeroporto aos voos está relacionada à quantidade de passageiros e o atraso com o objetivo de aumentar a taxa de transferência de passageiros em instalações de aeroportos. A prioridade dada pelas companhias aéreas é relacionada aos custos e lucro auferido em cada voo (receitas de vendas, custo variável incorrido, e custo fixo por passageiro). Em alguns casos, podemos inferir que quanto maior o número de passageiros por voo, maior o lucro para a companhia aérea responsável. Neste caso, ambos os jogadores têm benefícios por priorizar voos com mais passageiros. Nesse sentido, existe uma relação indireta entre eles. E para estratégias específicas não tratadas neste modelo, os jogadores podem trabalhar com a importância dada aos voos usando as funções α e β . Como exemplo, pode-se citar o tratamento de prioridade necessário à voos militares, voos governamentais, e outros.

6.7 Processo de Alocação

Os algoritmos do DA-SLOT foram modelados para serem executados no final da fase de Substituições e Cancelamentos (ver Figura 3.3). O processo consiste de três algoritmos, os quais foram chamados de Algoritmo de Pré-processamento, Algoritmo de Alocação e Algoritmo de Otimização.

6.7.1 Algoritmo de Pré-processamento

O procedimento de pré-processamento é apresentado no primeiro algoritmo. Nessa etapa, os dados de entrada são representados pelo conjunto F , onde cada voo $f \in F$, o conjunto S , onde cada *slot* $s \in S$, e o conjunto O , contendo as companhias aéreas proprietárias de *slots* vazios, tal que $o \in O$. Cada companhia o proprietária de *slots* vagos s , é definida no cronograma ao final da fase 2 do processo GDP (Substituições e Cancelamentos).

A função desse algoritmo é calcular as preferências \succ_F e \succ_S para utilização na etapa posterior, referente ao processo de alocação. As demais entradas do algoritmo são informações utilizadas pelas Equações (6.1) e (6.3).

A função de *Payoff* tem como argumentos o jogador e a estrutura de recompensa daquele jogador, representa pelas regras de cálculo definidas nas Equações (6.1) e (6.3),

Algoritmo 4: Pré-processamento

```
Data:  $F, S, O$   
Result:  $\langle F, S, \succ_F, \succ_S, O \rangle$   
/* Cada companhia aérea define a ordem de preferências para seus próprios voos  $f$   
de acordo com os slots disponíveis  $s$  (Equação (6.1)) */  
1 for  $f \in F$  do  
2   |  $r := \text{Payoff}(f, \text{Equação1}(F, S));$   
3   | Defina  $R$  como  $\{f, r\};$   
4 end  
5  $\text{SortDecreasingOrder}(R);$   
6  $\succ_F := R;$   
/* Baseado em uma lista de voos  $F$ , o aeroporto define uma lista de preferências  
 $\succ_S$  para cada slot  $s$ , guiado pelas premissas estratégicas (Equação (6.3)) */  
7 for  $s \in S$  do  
8   |  $r := \text{Payoff}(s, \text{Equação3}(F, S));$   
9   | Defina  $R$  como  $\{s, r\};$   
10 end  
11  $\text{SortDecreasingOrder}(R);$   
12  $\succ_S := R;$ 
```

e retorna o valor da recompensa como um número no intervalo $[0, \infty]$. O valor dessa recompensa é armazenado na variável r na forma $\{f, r\}$ e $\{s, r\}$, respectivamente. O conjunto de todas as recompensas r é formado por R , sendo essas preferências ordenadas de forma decrescente pela função *SortDecreasingOrder*. Finalmente, o conjunto ordenado R é usado para obter uma ordem de preferências entre os jogadores, neste caso, os voos e os *slots*.

Complexidade do Algoritmo de Pré-processamento

Nas linhas 1 e 7 pode ser verificado que o algoritmo executa para todos elementos dos conjuntos F e S , sendo que estes representam, respectivamente, os voos f_1, f_2, \dots, f_m , onde m é o número total de voos, e os *slots* s_1, s_2, \dots, s_n , onde n é o número total de *slots*. A função *Payoff*, nas linhas 2 e 8, executa utilizando as Equações (6.1) e (6.3). Como apenas a Equação (6.1) necessita de um somatório de custos entre os passageiros de um voo, número considerado pequeno, considera-se que esta execução tem tempo constante. Logo, nesses passos o algoritmo executa $O(m + n)$ vezes.

A função *SortDecreasingOrder* executada nas linhas 5 e 11 é um processo de ordenação decrescente das preferências, que no melhor caso pode ser $O(n \log n)$ e no caso médio é $O(n^2)$.

É importante notar que a estrutura das Equações (6.1) a (6.3), definidas pelas companhias aéreas e o aeroporto, afetam diretamente o tempo de execução deste algoritmo.

6.7.2 Algoritmo de Alocação

Após receber as listas de preferências de todos os jogadores desse mercado, \succ_F e \succ_S , calculados na etapa anterior, esse algoritmo realiza a associação das aeronaves aos *slots* do novo cronograma criado pelo Algoritmo RBS.

A ordem de propriedade dos *slots* vagos é preservada pelo conjunto O , onde cada o representa seus proprietários originais (companhias aéreas), tal que $O = \{\{s, o\}, \{s', o'\}, \dots\}$.

Algoritmo 5: Alocação

Data: $\langle F, S, \succ_F, \succ_S, O \rangle$
Result: $\mu : F \cup S$

```

1 Defina cada jogador de  $F$  e  $S$  como sozinho;
2 while  $\exists f \in F$ , onde  $f$  está sozinho do
3    $s :=$  primeiro slot em  $\succ_f$  que ainda não recebeu proposta de  $f$ ;
4   if  $s \geq ef$  then
5     if  $s$  está sozinho then
6       Forme par  $\{f, s\}$ ;
7     else
8       if  $s$  prefere algum  $f'$  ao par atual then
9         Forme novo par  $\{f', s\}$  e rejeite  $f$  anteriormente alocado;
10      else
11         $s$  rejeita  $f'$ ;
12      end
13    end
14  end
15 end

```

Neste segundo algoritmo, as linhas de 1 até 15 representam a fase de propostas, baseado no algoritmo DA, conforme explicado na Seção 2.3. Na estrutura definida para o DA-SLOT, os voos fazem as propostas de alocação e os *slots* decidem se aceitam ou recusam essas propostas.

O processo de aceite ou recusa dessas propostas, por parte dos *slots*, é realizado nas linhas 1 até 13. Como o motivo de execução deste processo é exatamente a situação onde alguns voos foram cancelados na segunda fase do CDM (Substituições e Cancelamentos), o número de voos sempre será menor que o número de *slots*.

A escolha de quais voos f ainda não estão alocados é realizada na linha 2, garantindo que a execução se repita para todos os elementos de F . A linha 3 busca o próximo *slot* s à quem o voo f não propôs ainda. Como cada voo pode realizar no máximo uma proposta para cada *slot*, em algum momento o algoritmo termina de forma que todas as aeronaves estejam alocadas.

O algoritmo apresentado consegue um *matching* estável, considerando as preferências de cada um dos participantes do mercado. Além disso, o Algoritmo de Alocação assegura o correto processamento, mesmo no caso de inconsistências na lista de preferências dos voos e *slots*, \succ_F, \succ_S , através do teste da linha 4. É importante notar que a responsabilidade

pela criação das regras definidas nas Equações (6.1) e (6.3) e processadas pelo Algoritmo de Pré-processamento, pertence às companhias aéreas e o aeroporto.

Complexidade do Algoritmo de Alocação

O algoritmo executa repetidamente para todo $f \in F$, onde $|F| = m$. Como um voo f pode fazer uma proposta para cada um dos *slots* s de sua lista de preferências, sendo $s \in S$, e onde $|S| = n$, o algoritmo executa $(m \times n)$. Logo, considerando que o pior caso é quando um *slot* a ser alocado para cada aeronave é sempre o último de sua lista de preferências, a complexidade é $O(n^2)$.

6.7.3 Algoritmo de Otimização

A função da etapa de otimização é otimizar o resultado inicial ao encontrar qualquer voo (respeitando a ordenação final da fase de propostas) que se encaixe em um melhor *slot*, isto é, um *slot* com horário mais cedo, de forma que $s \geq ef$. Além disso, o algoritmo associa aos *slots* vagos às suas companhias aéreas proprietárias originais.

Segue abaixo o Algoritmo 6, que executa a etapa de otimização do Processo de Alocação do DA-SLOT.

Algoritmo 6: Otimização

```

Data:  $\langle F, S, \succ_F, \succ_S, O \rangle$ 
Result:  $\mu : F \cup S$ 
/* Racionaliza slots vagos com base na ordem definida */
1 for  $s \in S$  do
2   if  $s$  está vazio then
3      $s' :=$  próximo slot depois de  $s$ , de tal forma que  $s' > s$ ;
4     for  $s' \in S$  do
5       if  $s'$  não está vazio then
6         if  $s \geq ef$  then
7           Associe o voo  $f'$  de  $\{f', s'\}$  e o slot  $s$  que está vazio, a formarem o par  $\{f', s\}$ ;
8           Defina  $s'$  vazio;
9           Break;
10        end
11       end
12     end
13   end
14 end
/* Slots vagos são distribuídos entre as companhias aéreas proprietárias */
15 for  $s \in S$  do
16   if  $s$  está vazio then
17      $Owner(s, o)$ ;
18   end
19 end

```

Da linha 1 à 14, o algoritmo procura todos os *slots* s do cronograma, aqueles que estão vagos (linha 2). Após identificar um *slot* vago, são analisados todos os *slots* posteriores s' que possuem uma aeronave associada à eles (linhas 4 e 5). Se a aeronave do *slot* posterior puder ser alocada (melhorada) para o *slot* vazio s (linha 6), esse processo é realizado nas linhas 7 e 8. O comando *Break* faz com que a execução volte para a linha 1, em busca do próximo *slot* vazio s no cronograma.

Nas linhas 15 à 19 o algoritmo verifica quais *slots* estão vagos (linha 16) e a função *Owner* associa a primeira companhia aérea proprietária $o \in O$ à esse *slot*, tal que $O = \{\{s, o\}, \dots\}$. É importante notar que se, por exemplo, existiam três *slots* desocupados no início do Processo de Alocação, vão continuar existindo três *slots* desocupados no fim do processamento.

Esse algoritmo deve sempre seguir a lista de preferências de todos os elementos alocáveis no modelo. Cada voo é definitivamente alocado no *slot* com o qual ele estava associado no último passo do algoritmo.

Como e_f é baseado no horário original de cada voo, identificam-se dois diferentes cenários que não precisam ser tratados pelos algoritmos: *i*) quando o horário de chegada possível de um voo é o último *slot* no cronograma, assim para todo $f \in F$, cada $e_f < |S|$, e *ii*) não existem dois voos com o mesmo *slot* de chegada no aeroporto de destino, porque para todo voo $f, f' \in F, e_f \neq e_{f'}$.

A prova de estabilidade do mecanismo DA para mercados de *matching* de dois lados aplicados à *slots* pode ser verificada em (Gale e Shapley, 1962) e (Roth e Sotomayor, 1989).

Complexidade do Algoritmo de Otimização

A primeira parte do algoritmo, onde $s \in S$, tal que $|S| = n$, ele executa pelo menos n vezes. Caso encontre algum s vazio, ele passa a buscar em S um s' com horário posterior à s , podendo ser executado até $(n \times (n - 1))$.

Na segunda parte do processo (linhas 15 à 19), o algoritmo executa por todo o conjunto dos *slots* S , que possui tamanho n . Logo, a complexidade do Algoritmo de Alocação é $O(n)$.

Na melhor das hipóteses, apenas o último *slot* s estará vazio e a complexidade do algoritmo será $O(n)$. No pior caso, onde existe apenas uma aeronave f em todo o cronograma e ela faz par com o último *slot* s , sendo seu $e_f = s$, a complexidade será $O(n^2)$.

6.8 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foi detalhada a arquitetura e implementação do modelo DA-SLOT através da descrição das entidades do CDM, relacionamento entre elas, objetivos, processos, funções de *payoff* e algoritmos de alocação.

Também foi abordado assuntos referentes à camada de entrada e saída de informações do modelo, uma visão geral das etapas de cálculo das preferências dos jogadores e os ciclos de execução dos algoritmos no processo de alocação de aeronaves e *slots*.

Apesar dos algoritmos propostos realizem o trabalho de alocação necessário, é importante salientar que como o DA-SLOT é uma proposta inicial, os algoritmos utilizados nas três etapas do processo de alocação foram construídos de forma a se manter a clareza e facilidade de entendimento dos objetivos modelo. Logo, otimizações quanto à complexidade de tempo e espaço dos processos serão realizadas em uma futura evolução do modelo.

Capítulo 7

Estudo de Caso

Neste capítulo serão apresentados alguns estudos de caso para a validação e análise do comportamento das funções de *payoff* e dos algoritmos propostos para o modelo DA-SLOT. Também será discutido o comportamento e integração das três etapas do Processo de Alocação, bem como, realizada uma análise comparativa entre o processo de alocação do DA-SLOT e o Algoritmo *Compression*, que é o processo hoje utilizado na abordagem da tomada de decisão colaborativa (CDM).

Para o modelo DA-SLOT, o Processo de Alocação é realizado através de três etapas, onde cada uma executa um algoritmo, conforme Figura 7.1.

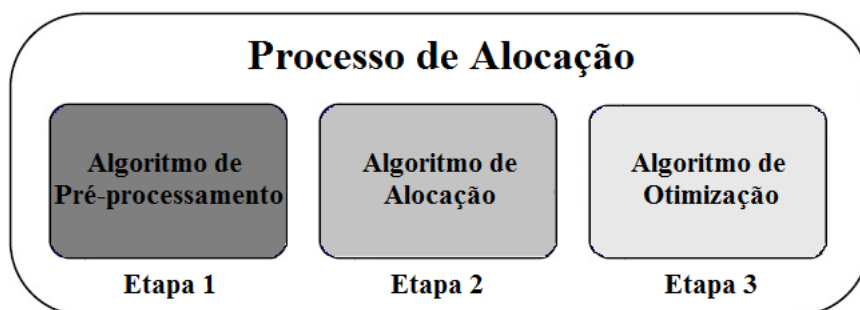


Figura 7.1: Processo de Alocação do modelo DA-SLOT (terceira fase)

7.1 Descrição do Cenário e Planejamento dos Casos

Os estudos de caso utilizam cenários que foram escolhidos para possibilitar a realização de uma análise comparativa do modelo proposto com o modelo já existente, da utilização das equações de cálculo de preferências dos jogadores junto ao processo de alocação, e da aplicação do modelo DA-SLOT junto à dados reais de um aeroporto. Logo, uma visão geral das principais características do modelo CDM clássico é dada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Características do Modelo CDM Clássico

Items	CDM Clássico
ATC	Trata restrições de utilização de pistas, impostas sobre os aeroportos
Companhia Aérea	Não possui preferências estratégicas sobre as alocações das aeronaves
Aeroporto	Não considerado
<i>Slots</i> de Chegada	São preenchidos sempre que possível
Propriedade de <i>slots</i>	Uma companhia aérea que não pode usar seu <i>slot</i> vago sempre é compensada através da troca de “propriedade” do <i>slot</i> com outra companhia que possua um voo que possa ser trocado
Prioridade	Os voos da companhia aérea proprietária do <i>slot</i> vago são considerados antes dos voos de outras companhias aéreas
Justiça	Ao fim do processo, cada companhia aérea possui a mesma porcentagem de <i>slots</i> do início do processo
Perda de <i>Slots</i>	Não existe uma forma da companhia aérea involuntariamente perder um <i>slot</i> de sua propriedade
Ordem de Execução	A ordem na qual os voos são escolhidos para execução influencia no resultado final das alocações
Estabilidade	Pode produzir resultados não estáveis

Inicialmente a execução do modelo proposto, baseado nos algoritmos do DA-SLOT, será validada junto à execução simultânea do Algoritmo *Compression*, utilizando uma abordagem comparativa lado-à-lado. É importante notar que tanto o Processo de Alocação quanto o Algoritmo *Compression* fazem parte da terceira fase do DA-SLOT e do CDM, respectivamente.

Esse estudo de caso, aplicado sobre um cenário onde apenas as etapas de alocação e de otimização são utilizadas, possibilita uma visualização mais rápida e compreensão direta do funcionamento dos principais mecanismos de alocação de ambos os processos. Os resultados aqui indicam que os algoritmos do DA-SLOT conseguem executar as alocações entre voos e *slots* com sucesso, assim como o Algoritmo *Compression*.

Após esse estudo, um novo cenário será analisado, com base em uma definição simplificada de listas de preferências. Essa abordagem foi proposta no artigo de Schummer e Rakesh (2013), sendo considerado o trabalho mais recente sobre teoria de *matching* aplicada ao CDM. O comportamento aqui demonstrado pelo processo de alocação do DA-SLOT permite um detalhamento maior sobre o funcionamento do modelo proposto, e resulta em um *matching* coerente e estável para os jogadores do mercado.

O último estudo de caso foi construído com base em dados reais do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (SBCF), da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Esse cenário conta com movimentos aéreos com atraso e cancelamentos realizados no decorrer do dia, que serão processados somente pelos algoritmos do DA-SLOT. Nesse estudo, são verificadas as principais características do modelo proposto, bem como, a execução completa do processo.

A execução completa do processo de alocação envolve as três etapas do DA-SLOT: um pré-processamento, onde é realizada definição das listas de preferências através das funções *payoff*; a etapa de alocação propriamente dita, e; uma etapa de otimização do resultado final.

Em todas as abordagens, cada linha de execução do processo de alocação do modelo DA-SLOT foi descrita passo-a-passo, para o correto entendimento e validação da proposta apresentada.

7.2 Cenário 1 – DA-SLOT *versus* *Compression*

A fim de exemplificar o funcionamento e comparar as diferentes características dos modelos CDM Clássico e DA-SLOT, nesta seção é apresentado um cenário hipotético de um programa de espera em solo (GDP).

Após a definição de um GDP, onde o aeroporto alvo é escolhido e novas taxas de utilização de pista (AAR) são calculadas, o processo de criação de um novo cronograma

de *slots* é executado através do Algoritmo *Ration-By-Schedule* (RBS). Nessa primeira fase, para ambos os modelos, um novo cronograma de *slots* é criado e os novos horários são distribuídos entre as aeronaves.

Na fase de Substituições e Cancelamentos (ver Figura 3.3 e Figura 5.1), as companhias aéreas decidem se priorizam alguns de seus voos em detrimentos de outros. Como alguns voos podem ser cancelados, os processos de alocação do DA-SLOT e do algoritmo *Compression* se iniciam na terceira fase. Este cenário inicial é apresentado na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Cenário Inicial: voos previstos

Slot	Voo	Companhia Aérea	e_f
s_1	vazio	A	
s_2	vazio	B	
s_3	f_3	C	1
s_4	f_4	B	1
s_5	f_5	A	2
s_6	f_6	D	5

Esse cenário é composto por quatro aeronaves que pertencem às companhias aéreas A, B, C, e D, e que competem por seis *slots*. No conjunto de *slots*, dois estão vagos, devido aos cancelamentos de voos ocorridos na etapa anterior. A última coluna apresenta o menor horário de chegada possível, e_f .

As listas de preferências criadas pelas companhias aéreas e o aeroporto, respectivamente, são mostradas na Tabela 7.3. As preferências foram geradas segundo as informações das Equações (6.1) e (6.3), referentes ao *payoff*, e calculadas pelo Algoritmo 4, na etapa de Pre-processamento do processo de alocação do DA-SLOT.

Tabela 7.3: Cenário Inicial: preferências

Companhia Aérea	Aeroporto
$P(f_3) = \{s_1 \succ s_3 \succ s_2 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6\}$	$P(s_1) = \{f_5 \succ f_4 \succ f_3 \succ f_6\}$
$P(f_4) = \{s_1 \succ s_3 \succ s_2 \succ s_4 \succ s_6 \succ s_5\}$	$P(s_2) = \{f_5 \succ f_3 \succ f_4 \succ f_6\}$
$P(f_5) = \{s_3 \succ s_6 \succ s_4 \succ s_1 \succ s_5 \succ s_2\}$	$P(s_3) = \{f_6 \succ f_4 \succ f_3 \succ f_5\}$
$P(f_6) = \{s_4 \succ s_2 \succ s_1 \succ s_3 \succ s_5 \succ s_6\}$	$P(s_4) = \{f_5 \succ f_6 \succ f_3 \succ f_4\}$
	$P(s_5) = \{f_6 \succ f_5 \succ f_3 \succ f_4\}$
	$P(s_6) = \{f_4 \succ f_5 \succ f_6 \succ f_3\}$

À seguir são descritos os ciclos e resultados, da execução do Algoritmo *Compression* do CDM clássico (descrito no Algoritmo 3) e do Algoritmo de Alocação do DA-SLOT (descrito no Algoritmo 5), ambos alimentados com os dados do cenário descrito nesta seção.

Ciclo 1 – Processo de Alocação

CDM Clássico

- Procure voos da companhia aérea A, proprietária de s_1 , que possam ser alocados à esse *slot*. Não existe voos possíveis, pois f_5 não pode ser alocado à s_1 , devido à restrição do seu menor horário de chegada possível (e_f)
- Procure voos da próxima companhia aérea, que possam ser alocados à s_1 . Forme um par entre f_3 e s_1 e troque as companhias aéreas proprietárias dos *slots* s_1 e s_3

DA-SLOT

- f_3 e f_4 fazem propostas de alocação à s_1 , f_5 propõe à s_3
- f_6 não pode fazer uma proposta à s_4 devido ao seu menor horário de chegada possível, de forma que ele propõe alocação à s_5
- s_1 aceita f_4 e rejeita f_3
- s_3 aceita f_5
- s_5 aceita f_6

Resultado Os resultados deste primeiro ciclo de execução dos algoritmo de alocação podem ser verificadas na Tabela 7.4.

Tabela 7.4: Comparação CDM Clássico x DA-SLOT (fim do ciclo 1)

Slot	CDM Clássico			DA-SLOT		
	Voo	Companhia Aérea	e_f	Voo	Companhia Aérea	e_f
s_1	f_3	C	1	f_4	B	1
s_2	vazio	B		vazio		
s_3	vazio	A		f_5	A	2
s_4	f_4	B	1	vazio		
s_5	f_5	A	2	f_6	D	5
s_6	f_6	D	5	vazio		

Ciclo 2 – Processo de Alocação

CDM Clássico

- Verifica que s_2 pertence à companhia aérea B e f_4 pode ser movido para s_2

DA-SLOT

- f_3 faz uma proposta de alocação para s_3 e, uma vez que s_3 prefere f_3 , a alocação provisória de s_3 é atualizada
- f_5 é então dispensado por s_3

Resultado Ao fim do segundo ciclo, os resultados podem ser verificados através da Tabela 7.5.

Tabela 7.5: Comparação CDM Clássico x DA-SLOT (fim do ciclo 2)

Slot	CDM Clássico			DA-SLOT		
	Voo	Companhia Aérea	e_f	Voo	Companhia Aérea	e_f
s_1	f_3	C	1	f_4	B	1
s_2	f_4	B	1	vazio		
s_3	vazio	A		f_3	C	1
s_4	vazio	B		vazio		
s_5	f_5	A	2	f_6	D	5
s_6	f_6	D	5	vazio		

Ciclo k – Processo de Alocação

CDM Clássico

- O próximo *slot* vazio pertence a companhia aérea A e dentre seus voos que podem ser alocados à ele, o voo f_5 é escolhido, devido à sua restrição quanto ao menor horário de chegada possível
- s_4 permanece vago, pois não existem voos possíveis de alocação
- f_6 é alocado à s_5

DA-SLOT

- f_5 faz uma proposta ao próximo *slot* mais preferido por ele, s_6
- f_3 é movido para s_2
- f_5 é movido para s_3

Ciclo k – Processo de Otimização

CDM Clássico

- Não possui tratamento final

DA-SLOT

- os *slots* vagos são distribuídos entre as companhias aéreas proprietárias iniciais, de acordo com a ordem original na Tabela 7.2

Resultado Ao fim do último ciclo (k), os algoritmos terminam com o cronograma de alocações mostrado na Tabela 7.6.

Tabela 7.6: Comparação CDM Clássico x DA-SLOT (resultado final)

Slot	CDM Clássico			DA-SLOT		
	Voo	Companhia Aérea	e_f	Voo	Companhia Aérea	e_f
s_1	f_3	C	1	f_4	B	1
s_2	f_4	B	1	f_3	C	1
s_3	f_5	A	2	f_5	A	2
s_4	vazio	B		vazio	A	
s_5	f_6	D	5	f_6	D	5
s_6	vazio	A		vazio	B	

O cenário apresentado no estudo de caso 1 ilustra o funcionamento dos dois processos estudados. É importante notar que, no modelo DA-SLOT, as companhias aéreas B e C não foram recompensadas ou punidas durante o processo de alocação de *slots*. Todas as alocações foram feitas respeitando-se as preferências das companhias aéreas, bem como do aeroporto. A ordem original de proprietários de *slots* vagos foi mantida até o final da execução dos algoritmos do modelo DA-SLOT e permitiu uma distribuição mais justa para as companhias aéreas, uma propriedade importante em situações onde pode ser exigida a re-execução do processo.

7.3 Cenário 2 – DA-SLOT com *Payoff* Simplificado

Neste cenário, são tratados movimentos aéreos de chegada do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (SBCF) na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Esse aeroporto foi escolhido devido ao grande número de voos diários de várias origens domésticas e internacionais. Atualmente sua capacidade é de aproximadamente 10.2 milhões de passageiros por ano (Brasil, 2014).

Todos os dados dos movimentos aéreos, do dia 13 de Novembro de 2014, foram extraídos do site on-line da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO). Esses dados representam cenários reais do fluxo aéreo brasileiro (Infraero, 2014).

Esse segundo estudo de caso é focado na execução sobre a regra de ordem de preferências sugerida por Schummer e Rakesh (2013). Em seu trabalho, os autores definem que o *slot* mais preferido por cada voo é o que possui seu horário original de chegada, seguido pelos próximos horários, em sequência.

Na presente abordagem, as companhias aéreas não fazem qualquer utilização da Equação (6.1) e do Algoritmo 4. Apesar de ser uma situação simplista, onde decisões estratégicas de uma das entidades principais não é levada em conta, ela é válida para efeito de avaliação do modelo DA-SLOT.

Após a implementação do GDP com uma taxa de chegada do aeroporto (AAR) de 6 aeronaves por hora, ou seja, uma aeronave a cada 10 minutos, e da execução do algoritmo *Ration-By-Schedule*, o cenário inicial do novo cronograma de *slots* é mostrado na Tabela 7.7.

Tabela 7.7: Cronograma original de *slots* e Cronograma RBS

Proprietário	Slot ID	Cronograma Original de Slots	Cronograma de Slots depois do RBS
TAP	s_1	10:28 pm	10:28 pm
AZUL	s_2	10:32 pm	10:38 pm
AZUL	s_3	10:35 pm	10:48 pm
AZUL	s_4	10:46 pm	10:58 pm
GOL	s_5	10:49 pm	11:08 pm
GOL	s_6	10:55 pm	11:18 pm
GOL	s_7	10:58 pm	11:28 pm
AZUL	s_8	11:14 pm	11:38 pm

Após a fase de Substituições e Cancelamentos, o voo f_5 , de número *GOL* – 1091, foi cancelado por decisão da companhia aérea, deixando o *slot* 11:08 pm vazio. Esta situação pode ser verificada na Tabela 7.8.

Tabela 7.8: Movimentos aéreos de chegada (AAR = 6 aeronaves / hora)

Voo ID	Companhia Aérea	Número do Voo	Origem	Aeronave	Capacidade de Passageiros	Slot Original	Slot RBS
f_1	TAP	TAP-0101	Lisboa	A332	268	10:28 pm	10:28 pm
f_2	AZUL	AZU-2557	RJ	E190	110	10:38 pm	10:38 pm
f_3	AZUL	AZU-2418	Guarulhos	E190	110	10:35 pm	10:48 pm
f_4	AZUL	AZU-4190	Campinas	E190	118	10:46 pm	10:58 pm
f_5	GOL	GOL-1091	Brasília	B738	183	Cancelado	11:08 pm
f_6	GOL	GOL-1670	RJ	B738	183	10:55 pm	11:18 pm
f_7	GOL	GOL-1320	São Paulo	B738	183	10:58 pm	11:28 pm
f_8	AZUL	AZU-4952	Curitiba	E190	118	11:14 pm	11:38 pm

Essa tabela também mostra as informações dos voos que preenchem os *slots* originais do cenário, bem como, os horários do novo cronograma de *slots* calculado pelo Algoritmo RBS.

A partir desse momento se inicia a terceira fase do modelo DA-SLOT, composta pelas etapas do Processo de Alocação. Essa terceira fase é composta por três etapas: a etapa de pré-processamento, a etapa de alocação e a etapa de otimização do cronograma.

O Algoritmo 4, referente à etapa de pré-processamento, é responsável pelas listas de preferências das aeronaves e *slots*. Como a regra para cada aeronave, neste caso, é utilizar seu *slot* original como o mais preferido, e os demais por forma crescente de horário, a Equação (6.1) não será utilizada no momento. Logo, as preferências calculadas para os voos são mostradas na Tabela 7.9.

Tabela 7.9: Listas de Preferências dos voos $f \in F$. Regra de Schummer e Rakesh (2013)

Voo ID	Voo	e_f	Slot ID	Slot RBS	\succ_F
f_1	TAP-0101	10:28 pm	s_1	10:28 pm	$s_1 \succ s_2 \succ s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$
f_2	AZU-2557	10:32 pm	s_2	10:38 pm	$s_2 \succ s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$
f_3	AZU-2418	10:35 pm	s_3	10:48 pm	$s_2 \succ s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$
f_4	AZU-4190	10:46 pm	s_4	10:58 pm	$s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$
f_5	GOL-1091	Cancelado	s_5	11:08 pm	Cancelado
f_6	GOL-1670	10:55 pm	s_6	11:18 pm	$s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$
f_7	GOL-1320	10:58 pm	s_7	11:28 pm	$s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$
f_8	AZU-4952	11:14 pm	s_8	11:38 pm	$s_6 \succ s_7 \succ s_8$

Na tabela acima, as preferências são definidas de forma que o voo f_1 , que possui e_f igual a 10:28, pode ocupar o *slot* s_1 e qualquer um dos demais *slots*. Quanto ao voo f_2 , seu e_f igual a 10:32 possibilita que ele possa ocupar o *slot* s_2 e qualquer um dos posteriores. E assim por diante.

Para realizar a definição das preferências de alocação dos *slots* sobre as aeronaves, a Algoritmo 4 da etapa de pré-processamento, através da Equações (6.2) e (6.3), utiliza informações como quantidade de passageiros das aeronaves, tempo de atraso, entre outras. Para este estudo de caso, α foi definido como 100%, ou seja, com valor 1. A evolução do cálculo de $D_S(f)$ pode ser verificada na Tabela 7.10.

No caso do parâmetro de ajuste c , definido aqui como 15 minutos, ele divide o tempo de atraso de cada aeronave de forma a normalizar o valor que será utilizado para a 6.3. Para resultados negativos, indicando que a aeronave não está atrasada, ou entre zero e um, a função θ ajusta o resultado para 1. Esse ajuste foi realizado para os voos f_1 , f_2 , f_3 , e f_4 . A tabela 7.11 mostra o cálculo de $R_S(f)$.

Com a ordenação gerada pelo cálculo da 6.3, isto é $R_S(f)$, a lista de preferências dos *slots* pode então ser montada. A 7.12 apresenta essa lista de preferências.

Tabela 7.10: Cálculo de $D_S(f)$ – Equação (6.2)

Voo ID	Cronograma de Slots depois do RBS $st(s)$	Slot Estimado de Chegada $at(f)$	$st(s) - at(f)$	Parâmetro de Ajuste (c)	$D_S(f)$ $\theta((st(s) - at(f), c))$
f_1	10:28 pm	10:28 pm	0	15	1,00
f_2	10:38 pm	10:32 pm	6	15	1,00
f_3	10:48 pm	10:35 pm	13	15	1,00
f_4	10:58 pm	10:46 pm	12	15	1,00
f_5	11:08 pm	Cancelado	Cancelado	Cancelado	Cancelado
f_6	11:18 pm	10:55 pm	23	15	1,53
f_7	11:28 pm	10:58 pm	30	15	2,00
f_8	11:38 pm	11:14 pm	24	15	1,60

Tabela 7.11: Cálculo de $R_S(f)$ – Equação (6.3)

Voo ID	Aeronave	Capacidade de Passageiros	$D_S(f)$	$R_S(f)$ $\beta(f)q^{D_S(f)}$	H^*
f_7	B738	183	2,00	33.489,00	1
f_6	B738	183	1,53	2.945,04	2
f_8	E190	118	1,60	2.065,43	3
f_1	A332	268	1,00	268,00	4
f_4	E190	118	1,00	118,00	5
f_2	E190	110	1,00	110,00	6
f_3	E190	110	1,00	110,00	7
f_5	B738	183	Cancelado	Cancelado	Cancelado

* Ordem de prioridade para o aeroporto

Tabela 7.12: Listas de Preferências dos *slots* – Equação (6.3)

Voo ID	e_f	H^*	Slot ID	Slot BRS	\succ_S
f_7	10:58 pm	1	s_1	10:28 pm	f_1
f_6	10:55 pm	2	s_2	10:38 pm	$f_1 \succ f_2 \succ f_3$
f_8	11:14 pm	3	s_3	10:48 pm	$f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_1	10:28 pm	4	s_4	10:58 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_4	10:46 pm	5	s_5	11:08 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_2	10:32 pm	6	s_6	11:18 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_8 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_3	10:35 pm	7	s_7	11:28 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_8 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_5	Cancelado	Cancelado	s_8	11:38 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_8 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$

* Ordem de prioridade para o aeroporto

Nesta tabela, s_1 , cujo novo horário calculado pelo Algoritmo RBS é 10:28 pm, pode receber apenas o voo f_1 , uma vez que seu menor horário de decolagem possível (e_f) é 10:28 pm. Nenhum outro voo conseguiria utilizar este *slot*, devido ao e_f de cada um deles. Por exemplo, o voo f_2 só conseguiria utilizar um *slot* à partir das 10:32 pm. Logo, para s_2 , os voos que conseguiriam utilizar esse *slot* são f_1 , f_2 e f_3 , nessa sequencia, segundo a

ordem de prioridade dos voos para o aeroporto. No caso do último *slot*, s_8 , todos os voos estariam habilitados à utilizá-lo, mas a ordem de prioridade define a lista de preferências da seguinte forma: $f_7 \succ f_6 \succ f_8 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$. A mesma lógica foi utilizada na definição das listas dos demais *slots*.

Com as listas de preferências montadas para ambos os conjuntos de jogadores, a segunda etapa do DA-SLOT executa o Algoritmo de Alocação para associar as aeronaves aos *slots*. Segue agora a sequência dos ciclos de execução desse processo. A Tabela 7.13 apresenta o resultado da etapa de pré-processamento para todos os jogadores.

Tabela 7.13: Listas de Preferências dos *slots* – Equação (6.3)

Voo ID	\succ_F	Slot ID	\succ_S
f_1 10:28 pm	$s_1 \succ s_2 \succ s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$	s_1 10:28 pm	f_1
f_2 10:32 pm	$s_2 \succ s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$	s_2 10:38 pm	$f_1 \succ f_2 \succ f_3$
f_3 10:35 pm	$s_2 \succ s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$	s_3 10:48 pm	$f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_4 10:46 pm	$s_3 \succ s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$	s_4 10:58 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_5 Cancelado	Cancelado	s_5 11:08 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_6 10:55 pm	$s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$	s_6 11:18 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_8 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_7 10:58 pm	$s_4 \succ s_5 \succ s_6 \succ s_7 \succ s_8$	s_7 11:28 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_8 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$
f_8 11:14 pm	$s_6 \succ s_7 \succ s_8$	s_8 11:38 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_8 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_2 \succ f_3$

Conforme o formato do estudo de caso anterior, segue a solução para o problema de alocação através do modelo DA-SLOT.

Ciclo 1 – Processo de Alocação DA-SLOT

- f_1 faz uma proposta de alocação ao *slot* s_1
- f_2 e f_3 fazem propostas de alocação à s_2 , f_4 propõe à s_3
- f_6 e f_7 propõe à s_4 , e f_8 à s_6
- s_1 aceita f_1
- s_2 aceita f_2 e rejeita f_3
- s_3 aceita f_4 , s_4 aceita f_7 e rejeita f_6
- s_6 aceita f_8

Ciclo 2 – Processo de Alocação DA-SLOT

- f_3 , recusado no ciclo anterior, faz um proposta à próxima opção mais desejada em suas preferências, s_3

- f_6 propõe à s_5
- s_3 recusa f_3 , permanecendo com seu par mais preferido, f_4
- o *slot* s_5 está vazio e aceita o voo f_6

Ciclo k – Processo de Alocação DA-SLOT

- f_3 faz propostas à s_4 , s_5 e s_6 , nesta sequência e é recusado por todos
- f_3 então propõe à s_7
- s_7 está vazio e aceita o voo f_3

Resultado Os resultados da etapa de alocação são apresentados na Tabela 7.14a e Tabela 7.14b.

Tabela 7.14: Processamento do DA-SLOT

(a) Primeira etapa de processamento do DA-SLOT (b) Resultado do processamento do DA-SLOT

Slot	Voo	Companhia Aérea	e_f	Slot	Voo	Companhia Aérea	e_f
s_1	f_1	TAP	1	s_1	f_1	TAP	1
s_2	f_2	AZUL	2	s_2	f_2	AZUL	2
s_3	f_4	AZUL	3	s_3	f_4	AZUL	3
s_4	f_7	GOL	4	s_4	f_7	GOL	4
s_5	vazio	–		s_5	f_6	GOL	4
s_6	f_8	AZUL	6	s_6	f_8	AZUL	6
s_7	vazio	–		s_7	f_3	AZUL	2
s_8	vazio	–		s_8	vazio	GOL	

O resultado final do processo de alocação do DA-SLOT se dá após o Algoritmo de Otimização definir o proprietário do *slot* vazio s_8 . É importante notar que neste estudo de caso, o menor horário de chegada possível de cada aeronave foi corretamente respeitado, de forma que o processo foi executado com coerência e seu resultado apresenta-se consistente.

7.4 Cenário 3 – DA-SLOT com *Payoff* Completo

Neste estudo de caso, também serão utilizadas as informações do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (SBCF) na cidade de Belo Horizonte. Uma vez que o aeroporto possui apenas uma pista, o seu cronograma original de voos pode ser configurado permitindo pousos antecipados ou atrasados. Essa característica nos permite avaliar os ajustes

feitos pelas companhias aéreas sobre o menor horário de chegada possível e_f de cada aeronave. Em outras palavras, o modelo proposto permite que as companhias aéreas estrategicamente antecipem ou atrasem o e_f de seus voos, tanto quanto as restrições operacionais permitirem. Desta forma, as companhias aéreas podem priorizar alguns voos sobre outros usando os resultados da Equação (6.1).

Atualmente dados referentes ao número de passageiros *on-board*, informações financeiras por voo, como receita de vendas das companhias aéreas, custo variável incorrido e custo fixo por passageiro, são de uso estratégico das companhias aéreas. Para resolver esse problema de disponibilidade foram utilizados dados adicionais extraídos diretamente da Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC), INFRAERO, e dos sites das companhias aéreas TAP Portugal, Azul, e Gol (ANAC, 2014; Azul, 2014; GOL, 2014; Infraero, 2014; Irvine, 2014; TAP, 2014).

Etapa de Pré-processamento

Os movimentos aéreos do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (SBCF) do período de 10:28 pm à 11:14 pm são mostrados na Tabela 7.15.

Tabela 7.15: Movimentos aéreos de chegada de SBCF (Infraero, 2014)

Voo ID	Companhia Aérea	Número do Voo	Origem	Aeronave	Capacidade de Passageiros	Slot
f_1	TAP	TAP-0101	Lisboa	A332	268	10:28 pm
f_2	AZUL	AZU-2557	RJ	E190	110	10:32 pm
f_3	AZUL	AZU-2418	Guarulhos	E190	110	10:35 pm
f_4	AZUL	AZU-4190	Campinas	E190	118	10:46 pm
f_5	GOL	GOL-1091	Brasília	B738	183	10:49 pm
f_6	GOL	GOL-1670	RJ	B738	183	10:55 pm
f_7	GOL	GOL-1320	São Paulo	B738	183	10:58 pm
f_8	AZUL	AZU-4952	Curitiba	E190	118	11:14 pm

Utilizando dados adicionais referentes aos tipos de aeronave e capacidade de passageiros, taxa de ocupação, custo de passagem por voo, e margem de lucro líquida por passageiro carregado, o Algoritmo 4 calcula o resultado por voo usando a função de *payoff* descrita na Equação (6.1). Aqui a função α foi definida para todos os casos com valor 1, ou seja, o mesmo grau de importância dada à todos.

A função de *payoff* $R_F(f)$ mostrada na Tabela 7.16 resulta em uma ordenação de prioridades para todos os voos afetados por um GDP. Esses resultados destacam os voos mais rentáveis para as companhias aéreas.

Agora essa informação pode ser usada pelas companhias aéreas para criar suas listas de preferências sobre cada um de seus voos. Para fazer isso uma informação adicional é necessária: o novo cronograma de *slots*, criado na primeira fase do processo GDP pelo

Tabela 7.16: Resultados na aplicação da Equação (6.1) nos dados de movimentos aéreos

Voo ID	Voo	Aeronave	Capacidade de Passageiros	Taxa de Ocupação	Preço da Passagem	Receita de Vendas	Custo Total por Voo	$R_F(f)$	Prioridade para Voos	Ordem de
f_1	TAP-0101	A332	268	80,7%	R\$ 2.100	R\$ 454.180	97,6%	10.900,31	1	1
f_7	GOL-1320	B738	183	80,6%	R\$ 310	R\$ 45.724	97,6%	1.097,39	2	2
f_8	AZU-4952	E190	118	80,6%	R\$ 250	R\$ 23.777	97,6%	570,65	3	3
f_6	GOL-1670	B738	183	80,6%	R\$ 155	R\$ 22.862	97,6%	548,69	4	4
f_2	AZU-2557	E190	110	80,6%	R\$ 230	R\$ 20.392	97,6%	489,40	5	5
f_4	AZU-4190	E190	118	80,6%	R\$ 165	R\$ 15.693	97,6%	376,63	6	6
f_3	AZU-2418	E190	110	80,6%	R\$ 170	R\$ 15.072	97,6%	361,73	7	7
f_5	GOL-1091	B738	Cancelado	Cancelado	Cancelado	Cancelado	Cancelado	Cancelado	0	0

Tabela 7.17: Lista de Preferências dos voos F

Voo ID	Voo	Ordem de Prioridade para Voos	Ordem de prioridade para Companhias Aéreas	e_f Ajustado	λ_F
f_1	TAP-0101	1	1	10:28 pm	s1 s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8
f_8	AZU-4952	3	1	11:14 pm → 11:08 pm	s6 s7 s8
f_2	AZU-2557	5	2	10:32 pm	s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8
f_4	AZU-4190	6	3	10:46 pm	s4 s5 s6 s7 s8
f_3	AZU-2418	7	4	10:35 pm	s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8
f_7	GOL-1320	2	1	10:58 pm → 10:52 pm	s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8
f_6	GOL-1670	4	2	10:55 pm	s4 s5 s6 s7 s8
f_5	GOL-1091	0	0	Cancelado	Cancelado

algoritmo *Ration-by-Schedule* (RBS) (Vossen e Ball, 2006a). O cronograma pode ser visto na Tabela 7.18.

Tabela 7.18: Cronograma original e cronograma novo para cada *slot*

Proprietário	Slot ID	Cronograma Original	Slots depois do RBS
TAP	s_1	10:28 pm	10:28 pm
AZUL	s_2	10:32 pm	10:38 pm
AZUL	s_3	10:35 pm	10:48 pm
AZUL	s_4	10:46 pm	10:58 pm
GOL	s_5	10:49 pm	11:08 pm
GOL	s_6	10:55 pm	11:18 pm
GOL	s_7	10:58 pm	11:28 pm
AZUL	s_8	11:14 pm	11:38 pm

Para escolher a melhor ordenação de preferências sobre os *slots*, cada companhia aérea agrupa seus próprios voos usando os resultados de $R_F(f)$ e decide os ajustes do menor horário de chegada possível e_f . A única limitação são restrições operacionais, como todos os passageiros devem estar presentes, a tripulação deve estar pronta e a aeronave abastecida e pronta para decolar.

Neste cenário os voos f_8 e f_7 foram considerados mais rentáveis para suas companhias aéreas e foram priorizados sobre os outros voos. O valor de e_f foi ajustado para o voo f_8 de 11:14 pm para 11:08 pm, permitindo a ele utilizar um *slot* mais cedo no processo de alocação. O mesmo foi feito com o voo f_7 e seu novo e_f , de 10:58 pm para 10:52 pm.

A lista de preferências dos voos \succ_F está disponível na Tabela 7.17.

Nesta parte do processamento, o e_f de cada voo é comparado a cada *slot* e analisado se a alocação é possível. Em caso positivo, cada *slot* é um candidato para alocação com aquele voo e é colocado em sua lista de preferências, em ordem crescente quanto ao horário do *slot*.

Uma vez que as listas de preferências dos voos foram calculadas, o Algoritmo 4 processa as listas de preferências dos *slots* de acordo com as definições do aeroporto na Equação (6.2) e Equação (6.3).

A Tabela 7.19 fornece as informações passo à passo para calcular $RS(f)$.

Uma explicação adicional deve ser feita sobre o parâmetro c e a função θ . Eles são usados para ajustar e normalizar o atraso que foi calculado pela Equação (6.2) no passo anterior. A função θ divide o atraso pelo parâmetro c . Caso o valor seja menor que 1, não existe atraso e o resultado é 1. Essa estratégia permite o cálculo de $R_S(f)$ através de um atraso normalizado que tem um valor mínimo de 1.

O atraso ajustado é utilizado para maximizar a importância dada aos voos atrasados com base na quantidade de passageiros e no próprio atraso. A Equação (6.3) calcula essa informação usando a informação de capacidade de passageiros multiplicada pela taxa de

Tabela 7.19: Resultados na aplicação da Equação (6.2) e da Equação (6.3) sobre os dados de movimentos aéreos

Voo ID	Capacidade de Passageiros	Taxa de Ocupação	Cronograma de Slots depois do RBS	Slot Estimado de Chegada $at(f)$	Parâmetro de Ajuste (c)	$st(s) - at(f)$	$\theta((st(s) - at(f), c)$	$R_S(f)$	H*
f_7	183	80,6%	11:16 pm	10:58 pm	10	18	1.8	8013	1
f_6	183	80,6%	11:08 pm	10:55 pm	10	13	1.3	660	2
f_1	268	80,7%	10:28 pm	10:28 pm	10	0	1	216	3
f_8	118	80,6%	11:24 pm	11:14 pm	10	10	1	95	4
f_4	118	80,6%	10:52 pm	10:46 pm	10	6	1	95	5
f_3	110	80,6%	10:44 pm	10:35 pm	10	9	1	89	6
f_2	110	80,6%	10:36 pm	10:32 pm	10	4	1	89	7
f_5	Cancelado	Cancelado	11:00 pm	10:49 pm	Cancelado	Cancelado	Cancelado	Cancelado	0

*Ordem de prioridade para o aeroporto

Tabela 7.20: Lista de preferências dos slots \succ_S

Voo ID	Companhia Aérea	H*	e_f Ajustado	Slot ID	Cronograma de Slots depois do RBS	\succ_S
f_7	GOL-1320	1	10:58 pm \rightarrow 10:52 pm	s_1	10:28 pm	f_1
f_6	GOL-1670	2	10:55 pm	s_2	10:36 pm	$f_1 \succ f_3 \succ f_2$
f_1	TAP-0101	3	10:28 pm	s_3	10:44 pm	$f_1 \succ f_3 \succ f_2$
f_8	AZU-4952	4	11:14 pm \rightarrow 11:08 pm	s_4	10:52 pm	$f_7 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_3 \succ f_2$
f_4	AZU-4190	6	10:46 pm	s_5	11:00 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_3 \succ f_2$
f_3	AZU-2418	5	10:35 pm	s_6	11:08 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_3 \succ f_2$
f_2	AZU-2557	7	10:32 pm	s_7	11:16 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_3 \succ f_2$
f_5	GOL-1091	0	Cancelado	s_8	11:24 pm	$f_7 \succ f_6 \succ f_1 \succ f_4 \succ f_3 \succ f_2$

*Ordem de prioridade para o aeroporto

ocupação da aeronave. Então, $R_S(f)$ é calculado pelo valor resultante elevado à potência do atraso ajustado. Nesse sentido, $R_S(f)$ é responsável por permitir ao aeroporto definir sua lista ordenada de prioridades.

Depois disso, o aeroporto é capaz de definir sua lista de preferências \succ_S . Para calcular as preferências de cada *slot*, o aeroporto utiliza a informação de e_f ajustado e a ordem de prioridade para o aeroporto. No *slot* 1, para o horário de 10:28 pm, o menor horário de chegada possível e_f dos voos 7 e 6 não permite que a alocação seja realizada nesse *slot*. O próximo voo mais preferido para o aeroporto é f_1 . De fato, nesse cenário, f_1 é o único voo que pode ser alocado à s_1 . Para o próximo *slot*, a ideia é a mesma. Na Tabela 7.20 são mostrados todos os resultados desse processo.

Etapa de Alocação

A etapa de alocação é o principal processo do modelo proposto. O objetivo é alocar todos os voos aos *slots* disponíveis, respeitando o menor horário de chegada e as preferências de todos os agentes. Para resolver esse problema o algoritmo utiliza as informações fornecidas pelos conjuntos de voos, *slots*, listas de preferências dos voos, listas de preferências dos *slots*, e os proprietários originais dos slots, respectivamente representados por F , S , \succ_F , \succ_S e O .

Na Tabela 7.21 podem ser verificadas as informações do cenário inicial do processo de alocação.

Uma característica interessante deste cenário é que o voo 1 poderia ser alocado em qualquer um dos *slots* porque seu e_f é o menor horário possível no cronograma, isto é, 10:28 pm. E o *slot* 1 pode aceitar somente o voo 1 porque ele é o único que pode chegar à tempo de utilizá-lo, de acordo com seu e_f .

O processo de alocação inicia com a etapa de proposta e aceitação. Primeiro, f_1 propõe à sua opção mais preferida, s_1 . Todos os outros voos seguem o mesmo passo, f_2 e f_3 propõe à s_2 , f_4 e f_7 propõe à s_4 , f_6 à s_5 e finalmente f_8 propõe à s_6 . Como s_1 está vazio, ele aceita a proposta e forma par com f_1 . O *slot* s_2 prefere f_3 ao invés de f_2 , e forma par com f_3 rejeitando f_2 , e assim por diante. A Tabela 7.22a mostra a alocação final depois dessa primeira rodada.

Na segunda rodada, f_2 faz uma proposta à sua opção mais preferida, s_3 , e f_4 propõe à s_5 . O *slot* s_3 está vazio e aceita a proposta de f_2 . O *slot* 5 que estava temporariamente alocado prefere ficar com seu par atual, f_6 , e rejeita f_4 .

Na próxima rodada, f_4 faz uma proposta à s_6 e é rejeitado novamente. O *slot* s_6 já se encontra alocado com um par mais preferido. Depois disso, f_4 tenta formar par com s_7 , que está vazio, e é aceito por ele. Na Tabela 7.22b são mostrados os resultados para a última rodada.

Tabela 7.21: Conjuntos de preferências dos voos (λ_F), preferências dos slots (λ_S), e os proprietários originais dos slots (O)

Companhia Aérea		Aeroporto								Proprietário		
$P(f_1)$	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	$P(s_1)$	f_1	$O(s_1)$	TAP
$P(f_2)$	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8		$P(s_2)$	f_1	$O(s_2)$	AZUL
$P(f_3)$	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8		$P(s_3)$	f_1	$O(s_3)$	AZUL
$P(f_4)$	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8				$P(s_4)$	f_1	$O(s_4)$	AZUL
$P(f_6)$	s_5	s_6	s_7	s_8					$P(s_5)$	f_1	$O(s_5)$	GOL
$P(f_7)$	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8				$P(s_6)$	f_1	$O(s_6)$	GOL
$P(f_8)$	s_6	s_7	s_8						$P(s_7)$	f_1	$O(s_7)$	GOL
									$P(s_8)$	f_1	$O(s_8)$	AZUL

Tabela 7.22: Processamento do DA-SLOT

(a) Primeira etapa de processamento do DA-SLOT (b) Resultado do processamento do DA-SLOT

Slot	Voo	Companhia Aérea	e_f	Slot	Voo	Companhia Aérea	e_f
s_1	f_1	TAP	1	s_1	f_1	TAP	1
s_2	f_3	AZUL	2	s_2	f_3	AZUL	2
s_3	vazio	–		s_3	f_2	AZUL	2
s_4	f_7	GOL	4	s_4	f_7	GOL	4
s_5	f_6	GOL	5	s_5	f_6	GOL	5
s_6	f_8	AZUL	6	s_6	f_8	AZUL	6
s_7	vazio	–		s_7	f_4	AZUL	4
s_8	vazio	–		s_8	vazio	GOL	

É importante notar que o processo de alocação termina com um *matching* estável entre voos e *slots*. Gale e Shapley (1962) demonstraram matematicamente essa afirmação através do mecanismo *Deferred Acceptance*. Para mais informações teóricas e práticas, ver Roth e Sotomayor (1989). Uma vantagem do ponto de vista prático do modelo proposto, é que pode ser visto que todas as restrições referentes ao menor horário possível dos voos foram respeitadas.

O último *slot* termina vazio porque o voo 5 foi cancelado. Então, neste caso, não temos uma situação que possa ser melhorada pela execução do passo final do algoritmo. Portanto, o passo do processo de otimização, presente no Algoritmo 6 como “racionalize *slots* vagos com base na ordem definida”, não é necessário para esse cenário. Entretanto, o procedimento de “*Slots* vagos são distribuídos entre as companhias aéreas proprietárias” é acionado, e s_8 passa a pertencer à companhia aérea GOL, proprietária inicial do *slot* vago.

7.5 Resumo do Capítulo

Neste Capítulo foram apresentados os estudos de caso sobre a abordagem proposta nesta Tese.

Para executar o processamento de alocação de slots, o mecanismo de alocação do modelo DA-SLOT executa um processo em três fases, onde uma etapa de pré-processamento realiza a criação das listas de preferência dos jogadores com base nas funções de *payoff* definidas na Equação (6.1), Equação (6.2), e Equação (6.3). Esse processo é executado através do Algoritmo de Pré-processamento. A próxima etapa executa a alocação propriamente dita, onde voos e *slots* formam pares através do Algoritmo de Alocação. E a última etapa realiza uma otimização no resultado, caso seja possível, devolvendo a propriedade

original dos *slots* vazios às companhias aéreas proprietárias, respeitando-se a ordem inicial definidas entre elas.

Os dados utilizados nos estudos de casos foram descritos quanto à sua origem e finalidade nos cenários dos testes. Utilizando-se exemplos de execução do programa de espera em solo (GDP), foi verificado o funcionamento desta proposta através da comparação do processo de alocação do DA-SLOT *versus* o algoritmo *Compression*. Além disso alguns estudos de caso utilizaram dados reais para verificar as principais características e funcionamento de ambos os modelos, DA-SLOT e CDM Clássico.

O que se pode inferir dos testes realizados é que, sem apresentar inicialmente as vantagens e desvantagens na sua utilização, ambos os modelos, CDM Clássico e DA-SLOT, conseguem realizar alocações de aeronaves e *slots*.

No próximo Capítulo serão analisados os resultados, apresentadas algumas provas, validações, e as características do modelo DA-SLOT.

Capítulo 8

Análise dos Resultados

Este capítulo apresenta uma análise das características e resultados alcançados com o uso do modelo DA-SLOT.

No conjunto das validações, será realizada uma análise qualitativa sobre o comportamento do modelo durante sua execução nos cenários utilizados nos estudos de caso. Quanto às características desejáveis de um processo baseado no mecanismo DA, serão fornecidas algumas provas conceituais necessárias à validação do modelo, como a estabilidade e a manipulabilidade dos resultados. Também será apresentada uma comparação das principais características de um GDP executado através do processo de alocação DA-SLOT e através do *Compression*.

8.1 Validação do Modelo

O modelo DA-SLOT foi avaliado quanto ao seu funcionamento e a consistência no resultado final fornecido. Em um dos estudos de caso, o processo de alocação deste modelo foi executado em paralelo ao Algoritmo *Compression*, que é o algoritmo atualmente em uso nos programas de espera em solo (GDP).

Apesar de funcionarem de forma diferente, os resultados mostraram que ambos os processos produzem alocações seguindo o principal objetivo do CDM, onde *slots* vazios são preenchidos sempre que possível (Butler, 1998; Hoffman, 1997). Nessa estrutura, o processo de alocação não conta com a participação direta do serviço ATC, mas este atua como um regulador para as companhias aéreas e os aeroportos.

O tratamento dado às restrições de horários das aeronaves permitiu a manutenção da segurança e eficiência do processo de alocação (Algoritmo 5). Esse tratamento, realizado através de e_f , garante que cada aeronave concorra somente com *slots* adequados ao seu tempo hábil operacional.

É importante notar que, segundo as Definições de *Menor Horário de Chegada Possível* e *Pares Aceitáveis* na Seção 5.3, os jogadores jamais deveriam definir preferências onde o e_f individual das aeronaves não fosse respeitado. Logo, o teste ($s \geq e_f$) realizado no Algoritmo 5 (linha 4) é um tratamento de exceção, pois caso isso aconteça, o processo crítico de alocação em um GDP não pode ser interrompido.

Além disso, se uma aeronave não puder ser tratada no processo de alocação do Algoritmo 5, o processo de otimização posterior, realizado pelo Algoritmo 6, permite que esta mesma aeronave seja alocada nos *slots* vazios restantes. No modelo apresentado não foram verificados problemas de consistência como uma aeronave ficar sem alocação ou duas aeronaves alocadas no mesmo *slot*. Tais situações são devidamente tratadas pelo modelo.

Abaixo, segue um resumo dos resultados alcançados com os demais estudos de caso, no processo de alocação de aeronaves e *slots*:

- *Objetividade*: as funções de *payoff*, que representam os objetivos de cada lado do mercado, foram utilizadas com sucesso na criação de listas de preferência para todos os jogadores;
- *Coerência*: as preferências de alocação de todos os jogadores do mercado foram tratadas corretamente, segundo o mecanismo adotado;
- *Segurança*: para as aeronaves, o menor horário de chegada e_f foi respeitado em todas as situações, evitando necessidade de alteração de velocidade para cumprir horários irrealistas;
- *Eficiência*: para os *slots*, somente aeronaves com possibilidade real de utilização foram alocadas, evitando desperdício de recursos;
- *Consistência*: os *matchings* gerados representam uma alocação ótima e estável, uma vez que leva em consideração as preferências de alocação de todos os participantes;
- *Otimização*: nos casos onde a estrutura de *slots* preenchidos e de *slots* vazios permite, o processo executa uma otimização do resultado final;
- *Justiça*: na última etapa, os *slots* vazios são redistribuídos entre suas companhias aéreas proprietárias, mantendo a ordem de distribuição original entre elas.

Basicamente, através do comportamento e resultados gerados pelo processo de alocação, verificou-se que, do ponto de vista estrutural e funcional, todos os objetivos e características definidos na modelagem do DA-SLOT foram respeitados.

8.2 Estabilidade do Modelo

Além das validações já realizadas sobre o modelo, algoritmos de alocação baseados no mecanismo *Deferred Acceptance* possuem características matematicamente comprovadas pela teoria dos jogos Roth e Sotomayor (1989).

Uma das mais importantes, segundo Gale e Shapley (1962) e Gusfield e Irving (1989), é que o resultado gerado sempre é um *matching* estável. Abaixo segue a prova, com foco na etapa de alocações do modelo DA-SLOT.

8.2.1 Prova de Estabilidade

Teorema 1 – O processo DA-SLOT sempre produz *matching* estável.

Prova: O teorema seja provado por contradição. Suponha que o algoritmo termine com um *matching* que não é estável μ , onde $\mu = \{\{f, s\}, \{f', s'\}, \{f'', s''\}, \dots, \{f^n, s^n\}\}$. Logo, existe um *par bloqueador* $\{f, s'\}$ onde $f \in F$ e $s' \in S$, sendo que $P(f) = \{s' \succ s\}$ e $P(s') = \{f \succ f'\}$. Entretanto, utilizando-se o processo de alocação DA-SLOT, sabemos que se o voo f prefere o *slot* s' ao seu par atual s , ele teria feito uma proposta para s' em algum momento e este, se também prefere f ao seu parceiro atual f' , teria aceitado, gerando a alocação $\{f, s'\}$. Como tal alocação não existe, sabemos que em algum momento o *slot* s' aceitou a proposta de alguém que ele prefere mais que f . Assim, verificamos que ao final do algoritmo, o *slot* s' prefere mais o voo f' à f , onde $P(s') = \{f' \succ f\}$, gerando uma contradição com a hipótese inicial. Portanto, podemos ver para o *matching* μ apresentado, o processo de alocação do *DA-SLOT* sempre respeita as preferências dos jogadores, gerando um resultado *estável*, isto é, sem *pares bloqueadores*.

8.3 Manipulação de Resultados

Segundo Dubins e Freedman (1981), sabe-se que o Algoritmo *Deferred Acceptance* para o mercado de dois lados não é à prova de estratégia. Isso significa que algum jogador pode se beneficiar ao informar uma ordem de preferências diferente de suas reais intenções de alocação.

Para resolver esse problema, o mercado de *slots* com o qual o processo de alocação do DA-SLOT trabalha precisou ser modelado de uma forma que essa característica não afetasse a integridade dos resultados.

Segue abaixo argumentação e prova complementar que justifica a modelagem específica utilizada no mercado de *slots* do DA-SLOT.

8.3.1 Estabilidade Ótima para Proponentes

Apesar do processo de alocação DA-SLOT sempre encontrar um *matching* estável, podem existir outros *matchings* que também são estáveis. A melhor forma de se verificar essa afirmação é trocando os voos e os *slots* de lugar. Nesta nova versão, os *slots* fariam as propostas e os voos ficariam com a tarefa de aceitar ou rejeitar essas propostas.

Neste caso, onde os proponentes são os *slots*, o DA-SLOT pode encontrar um *matching* que também é estável, mas que é diferente do *matching* encontrado quando os voos propõem (Gusfield e Irving, 1989). Neste caso, quando existe mais de um *matching* estável, pode ser verificado que quando os voos propõem, o resultado encontrado é *ótimo* para os voos, e que quando os *slots* propõem, o resultado encontrado é *ótimo* para os *slots* (Definição 2.11 de Roth e Sotomayor (1989)). Segue a prova dessa afirmação.

Teorema 2 - Dado um *matching* estável μ , calculado pelo algoritmo de alocação do modelo DA-SLOT com os voos propondo, e sendo $\mu = \{\{f, s\}, \{f', s'\}, \{f'', s''\}, \dots, \{f^n, s^n\}\}$, onde todos os voos $f \in F$ e *slots* $s \in S$ possuem preferências na forma $P(f) = \{s \succ s' \succ s'' \succ \dots \succ s^n\}$ e $P(s) = \{f \succ f' \succ f'' \succ \dots \succ f^n\}$, μ é um *matching* ótimo para os voos se não existe nenhum outro *matching* μ' que seja melhor para pelo menos um voo $f \in F$

Prova: Suponha, sem perda de generalidade, que para pelo menos um voo $f \in F$ exista um resultado onde um *matching* μ' seja melhor que o *matching* μ . Neste caso, existe um *slot* $s' \in S$ alocado com ele em μ' , e que ele prefere mais do o *slot* atual $s \in S$, alocado pelo algoritmo do modelo DA-SLOT em μ . Logo, podemos deduzir a preferência $P(f) = \{s' \succ s\}$ para o voo f e isso indica que ele propôs ao *slot* s' antes de propor ao *slot* s . Entretanto, para o voo f ter terminado alocado com o *slot* s em μ , o *slot* s' deve obrigatoriamente ter recebido uma proposta de f em algum momento e recusado. E para isso ter ocorrido, s' deve ter recebido outra proposta de alguém que ele prefere mais que f , neste caso f' . Logo, podemos deduzir também a preferência de s' como $P(s') = \{f' \succ f\}$. Já para o voo f' , se este fez uma proposta ao *slot* s' , todas os *slots* mais preferidos por este o recusaram anteriormente. Mas para f estar alocado com s' em μ' , sendo que este prefere mais f' do que f , então f' deve estar alocado com um *slot* menos desejado por ele. Portanto, as incoerências da alocação $\{f, s'\}$, onde o voo f' é mais preferido que f para o *slot* s' , e quanto à f' , que será alocado com um *slot* menos preferido por este, concluímos que existe um *par bloqueador* $\{f', s'\}$ em μ' . Logo, por contradição, vemos que a afirmação $\{\mu' \succ \mu\}$ é falsa, onde μ' não é um *matching* estável.

Fazendo as devidas associações, nos casos em que o melhor *matching* para os voos é também o melhor *matching* para os *slots*, esse *matching* é o único *matching* estável para esse mercado (Roth e Sotomayor, 1989).

E segundo o Teorema 2.27 de Roth e Sotomayor (1989), o mecanismo DA calcula um *matching* que é fracamente um ótimo de Pareto (*weakly Pareto optimal*)⁴ para o lado do mercado que realiza as propostas. Isso significa que não existe *matching* estável onde algum dos proponentes possa melhorar sem que outro proponente fique com um resultado pior (Roth, 1982). Logo, o *matching* calculado por um mecanismo DA possui estabilidade ótima para proponentes.

8.3.2 Estrutura à Prova de Estratégia

Conforme afirmado anteriormente, existe incentivo para a manipulação de resultados no mercado de dois lados, onde o mecanismo *Deferred Acceptance* é utilizado Roth (1982).

Apesar de ser uma propriedade indesejada neste tipo de solução, foi provado matematicamente que a possibilidade de obter algum resultado melhor com a manipulação de listas de preferências fica restrita apenas aos jogadores do lado do mercado que recebem as propostas de alocação (Dubins e Freedman, 1981).

No mercado modelado para o DA-SLOT, os *slots* recebem as propostas. Logo, apesar de cada *slot* possuir uma lista de preferências, eles são considerados elementos alocáveis nesse cenário, e não tomadores de decisão. Essa distinção fica clara à medida em que pensamos que no cenário real onde os *slots* não tomam decisões, mas sim o aeroporto afetado pelo GDP. A partir dessa estrutura, mais uma definição para o modelo DA-SLOT pode ser mostrada.

Definição 9 – Estrutura à Prova de Estratégia – A arquitetura do DA-SLOT é à prova de estratégia.

Para se verificar tal afirmação, é necessário analisar as características do “mercado de casamentos” e do “mercado de *slots*”.

No mercado de casamentos, ambos os lados, inclusive o que recebe as propostas, possuem preferências estratégicas sobre os elementos do conjunto oposto. Nesta estrutura, onde o processo de alocação estável é realizado pelo algoritmo DA, os próprios jogadores são alocados entre si.

Isso pode ser observado na Figura 8.1, onde as estruturas dos dois tipos de mercado são apresentadas.

⁴ *Ótimo de Pareto*: termo utilizado para designar uma situação de equilíbrio na qual a utilidade de algum jogador (*payoff*) não pode ser melhorada sem que se piore a utilidade de outro jogador. A situação onde o resultado de pelo menos um jogador (mas não todos) pode melhorar, sem que nenhum outro fique pior, é conhecida como ótimo de Pareto fraco. A situação onde todos os jogadores podem melhorar é conhecida como ótimo de Pareto forte (Nozick, 2001).

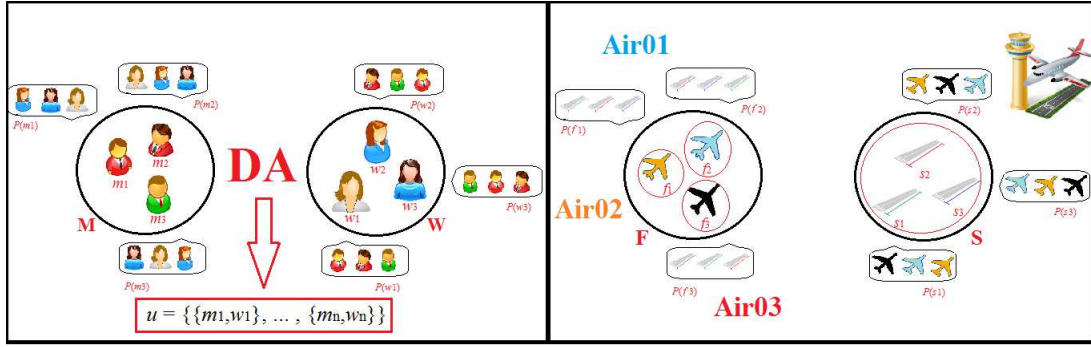


Figura 8.1: Mercado de Casamentos x Mercado de Slots.

Podemos ver que na estrutura do mercado modelado para o DA-SLOT, são os *slots* que recebem as propostas. Entretanto, como só existe um jogador que toma decisões estratégicas desse lado, o gestor do aeroporto afetado por um GDP, existe apenas um subconjunto composto por todos os seus *slots*. Vamos supor que exista uma situação onde o gestor do aeroporto informe as preferências de algum de seus *slots* de forma incorreta. Se isso acontecer, existe algum incentivo para que esse *slot* possa obter alguma vantagem sobre os demais *slots* desse mercado. Entretanto, tal situação caracterizaria que o próprio aeroporto obteria vantagens sobre si mesmo. E como ele é o único jogador desse lado do mercado, entende-se que não existe incentivo para ele trapacear a si mesmo. Logo, as preferências de cada *slot* devem ser definidas de forma fidedigna, conforme os objetivos estratégicos do próprio aeroporto.

8.4 Resultados Ótimos

À partir das propriedades já mostradas do mecanismo DA e de algumas características da arquitetura do modelo DA-SLOT, podemos inferir que:

- O resultado calculado pelo mecanismo utilizado no modelo DA-SLOT é estável (Gale e Shapley, 1962);
- Cada aeronave proponente irá informar suas verdadeiras preferências porque em qualquer outra situação, ela correrá o risco de conseguir um resultado pior para si no *matching* (Teorema 4.7 de Roth e Sotomayor (1989), Dubins e Freedman (1981)), e;
- Apesar de não existir um mecanismo de *matching* que seja uma estratégia dominante para o lado que recebe as propostas (Roth, 1982), na arquitetura proposta os *slots* não possuem incentivo para manipular resultados.

Logo, segue uma definição adicional das características do modelo DA-SLOT.

Definição 10 – Resultado Ótimo – Uma vez que para o DA-SLOT (a) um *matching* estável é sempre encontrado, considerando as preferências estratégicas de todos os jogadores do mercado, (b) as alocações são fracamente um ótimo de Pareto para os proponentes, e (c) não existe incentivo individual para a manipulação de preferências pelos elementos de ambos os lados, dizemos que o resultado calculado é *ótimo*.

8.5 Comparação DA-SLOT versus CDM Clássico

A Tabela 8.1 sumariza as principais diferenças entre o modelo DA-SLOT e o modelo CDM clássico, observados nessa pesquisa.

A metodologia de análise utilizada neste trabalho foi realizada de forma semelhante sobre o Algoritmo *Compression*, em trabalhos como o de (Hoffman, 1997) e (Butler, 1998).

Com a finalização dos estudos de caso, o modelo DA-SLOT apresentou-se adequado para realizar a tarefa de alocação de aeronaves em uma fila de *slots*, do ponto de vista estrutural e funcional. Portanto, a consistência das regras utilizadas nesta proposta foram verificadas com sucesso.

8.6 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou a análise dos resultados dos estudos de casos e algumas provas das características do mecanismo DA e da arquitetura do modelo DA-SLOT.

Aqui foram tratadas questões importantes como validade do modelo proposto, propriedades desejáveis como estabilidade e resultado ótimo para os proponentes, e tratamento de propriedades indesejáveis como a possibilidade de manipulação de resultados pela parte que recebe as propostas de alocação.

Também foram analisados os algoritmos de função de *payoff*, de alocação e otimização, além de realizada uma comparação qualitativa entre o modelo DA-SLOT e o modelo CDM clássico.

Com isso, este capítulo possibilitou uma visão mais completa a respeito das características da solução proposta onde, dados os resultados alcançados, o modelo DA-SLOT mostrou-se uma possibilidade viável para o processo de alocação de *slots* do CDM.

Tabela 8.1: Comparação do DA-SLOT e CDM Clássico

Items	CDM Clássico	DA-SLOT
ATC	Trata restrições de utilização de pistas, impostas sobre os aeroportos	Trata restrições de utilização de pistas, impostas sobre os aeroportos
Companhia Aérea	Não possui preferências estratégicas sobre as alocações das aeronaves	Possui preferências estratégicas sobre as alocações das aeronaves
Aeroporto	Não considerado	Possui preferências estratégicas sobre as alocações dos <i>slots</i> .
<i>Slots</i> de Chegada	São preenchidos sempre que possível	São preenchidos sempre que possível
Propriedade de <i>slots</i>	Uma companhia aérea que não pode usar seu <i>slot</i> vago sempre é compensada através da troca de “propriedade” do <i>slot</i> com outra companhia que possua um voo que possa ser trocado	As companhias aéreas mantêm a propriedade sobre seus <i>slots</i> vagos ao fim do processo, com a garantia da ordem original
Prioridade	Os voos da companhia aérea proprietária do <i>slot</i> vago são considerados antes dos voos de outras companhias aéreas	Todos os voos possuem a mesma prioridade na execução
Justiça	Ao fim do processo, cada companhia aérea possui a mesma porcentagem de <i>slots</i> do início do processo	Ao fim do processo, cada companhia aérea possui a mesma porcentagem de <i>slots</i> do início do processo
Perda de <i>Slots</i>	Não existe uma forma da companhia aérea involuntariamente perder um <i>slot</i> de sua propriedade	Não existe uma forma da companhia aérea involuntariamente perder um <i>slot</i> de sua propriedade
Ordem de Execução	A ordem na qual os voos são escolhidos para execução influencia no resultado final das alocações	A ordem na qual os voos são escolhidos para execução não influencia no resultado final das alocações
Estabilidade	Pode produzir resultados não estáveis	Sempre encontra um resultado estável

Capítulo 9

Conclusão

A presente Tese investigou e propôs uma nova abordagem que utiliza a teoria de *matching* (Gale e Shapley, 1962) na solução do problema de alocação de *slots* em programas de espera em solo (GDP). A pesquisa realizada permitiu a modelagem de um processo de alocação composto por três algoritmos, possibilitando a entrada de um novo interveniente no processo de tomada de decisão: o gestor do aeroporto afetado por um GDP.

O modelo proposto, chamado DA-SLOT, é uma adaptação do mecanismo *Deferred Acceptance*, criado por Gale e Shapley (1962). Esse mecanismo, utilizado extensivamente em diversos cenários reais, apresentou-se adequado ao tratamento de alocação de recursos em ambientes críticos e competitivos.

Neste Capítulo serão apresentados: (a) um resumo da pesquisa realizada, (b) uma visão geral e evolução dos problemas abordados, (c) a contribuição teórica desta Tese, (d) as restrições do modelo proposto e os desafios encontrados, (e) as perspectivas para trabalhos futuros, e (f) as considerações finais.

9.1 Visão Geral

Nos anos 1990, a filosofia da tomada de decisão colaborativa (CDM) serviu como base para a criação dos novos processos do gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo (ATM). Nos dias atuais, alguns processos ainda em uso não refletem mais as necessidades de todos os participantes do sistema ATM.

Por exemplo, no Brasil, a entrada das concessionárias na gestão dos recursos aeroportuários causa um impacto direto nos processos que tratam a organização das pistas de pouso e decolagem (Almeida *et al.*, 2014; DECEA, 2013). E como os voos normalmente possuem origem e destino em aeroportos, a ausência de participação desse importante interveniente em alguns processos de tomada de decisão pode afetar a eficiência do sistema de forma global.

No caso específico dos programas de espera em solo construídos sob a filosofia CDM, o processo de alocação de *slots* não contempla a participação do gestor do aeroporto afetado por medidas restritivas de controle de fluxo. Somando a esse fato, o Algoritmo *Compression* (Hoffman, 1997), utilizado em uma das principais etapas do GDP, nem sempre encontra um resultado ótimo no processo de alocação (Schummer e Rakesh, 2013).

Para tratar a otimização do GDP, diferentes abordagens automatizadas foram propostas nos últimos anos, bem como, várias tentativas para melhorar este modelo (Tabela 4.1). Ainda sobre esse contexto, sistemas inteligentes de sequenciamento de voos, gerenciamento de portões de embarque, e problemas relacionados têm sido extensivamente estudados (Chan *et al.*, 2012; Cheng *et al.*, 2012; Delavar *et al.*, 2010; Genc *et al.*, 2012; Jo *et al.*, 1997; Kuwata e Oohama, 1997). Entretanto, a introdução de um novo participante no processo de alocação de *slots* ainda não foi considerada. Mesmo quando abordagens teóricas baseadas teoria de jogos foram consideradas, os modelos propostos focaram apenas em um número limitado de *stakeholders* (Balakrishnan, 2007; Schummer e Rakesh, 2013).

Logo, a problemática do CDM abordada nessa Tese, a pesquisa das soluções existentes e o levantamento do atual estado da arte, confirmam que os modelos de tomada de decisão baseados na filosofia CDM já propostos não acompanharam a dinâmica das mudanças ocorridas no cenário de gerenciamento de tráfego aéreo nas últimas décadas.

9.2 Contribuições

Os serviços prestados pelo ATM, além de serem sensíveis para a economia de um país, são formados através de modelos cujos requisitos básicos são a segurança e a eficiência dos processos operacionais (Hoffman, 1997). Logo, este trabalho se fundamentou na necessidade de evolução dos processos de gerenciamento de tráfego aéreo.

Com base nessas premissas, esta Tese apresentou um novo modelo de alocação de *slots* denominado DA-SLOT. Além de permitir que companhias aéreas e o gestor do aeroporto definam preferências estratégicas individuais sobre os resultados das alocações entre aeronaves e *slots*, o modelo também mantém as relações de segurança e eficiências originalmente previstos pelo CDM.

Conforme a solução proposta (Capítulos 5 e 6), esta Tese apresenta contribuição multidisciplinar nas áreas de:

- **Ciência da Computação:** com o desenvolvimento e análise de algoritmos que calculam resultados ótimos para o problema de alocação de *slots*, bem como, das funções de *payoff* utilizadas pelos *stakeholders* no CDM;

- **Teoria dos Jogos:** com a adaptação da teoria de mercados de *matching* na criação de um novo modelo de *mercado de slots*, definição de jogadores e estrutura de relacionamento;
- **Transportes:** com a otimização do programa de atraso em solo (GDP), processo utilizado no tratamento crítico de situações de congestionamento para o ATM.

As funções de *payoff* foram construídas segundo objetivos específicos definidos para cada jogador. Para as companhias aéreas, seu objetivo é maximizar o lucro (Equação (6.1)), e para o gestor do aeroporto, é priorizar aeronaves atrasadas e a quantidade de passageiros (Equação (6.3)). Quanto ao processo de alocação do DA-SLOT, o primeiro algoritmo é responsável pela construção das listas de preferências de aeronaves e *slots* (Algoritmo 4), o segundo pela alocação propriamente dita (Algoritmo 5), e o terceiro pela otimização do resultado (Algoritmo 6). Além disso, a arquitetura construída para o DA-SLOT pode ser considerada à prova de estratégia, onde os resultados calculados são considerados ótimos (Seção 8.3).

Esta Tese também apresenta significativa relevância para aos usuários dos serviços do ATM, uma vez as propostas de pesquisa até então apresentadas não contemplam a participação dos *stakeholders* mais importantes no processo de tomada de decisão em um programa de espera em solo.

9.3 Validade e Limitações do Modelo

O funcionamento do modelo DA-SLOT foi avaliado através de alguns estudos de caso presentes no Capítulo 7. A segurança e efetividade do DA-SLOT pôde ser conferida através de sua execução lado-à-lado ao Algoritmo *Compression* (Hoffman, 1997) do CDM Clássico. A consistência das alocações foi realizada através do uso de uma variável (e_f) representando o menor horário de chegada possível (EPAT) de cada aeronave. O correto tratamento do EPAT impede que ocorram situações onde aeronaves sejam alocadas em *slots* aos quais elas não teriam tempo hábil para utilização.

As características desejáveis do mecanismo DA, no qual o algoritmo de alocação do modelo DA-SLOT é baseado, podem ser verificadas em Gale e Shapley (1962) e Roth e Sotomayor (1989). Para analisar o problema do ponto de vista de otimização algorítmica, trabalhos como Gusfield e Irving (1989) e Nisan *et al.* (2007) revisitam o problema de *matching* em mercados de dois lados.

Características específicas do mecanismo DA para o mercado de casamentos de Gale e Shapley (1962), como (a) a situação de uma mulher nunca piora ao longo do algoritmo, (b) duas mulheres não podem estar noivas do mesmo homem, (c) todo problema de

casamentos admite pelo menos um *matching* estável, e (d) o *matching* obtido através do algoritmo é sempre estável, entre outras, podem ser verificadas em maior detalhe em Ramos (2007).

Além dessas características, a estrutura de modelagem do DA-SLOT garante a inexistência de incentivo para manipulação dos resultados por parte dos proponentes, conforme consta no trabalho de Roth e Sotomayor (1989) (ver Teorema 4.7 na página 90), com base nas provas demonstradas por Dubins e Freedman (1981). Segundo esses estudos, o único lado que poderia ter algum interesse em mentir sobre sua lista de preferências são os jogadores que recebem as propostas de alocação, ou seja, os *slots*.

No modelo DA-SLOT, esta característica indesejada foi suprimida ao se fazer com que as preferências dos *slots* sejam formadas por um único jogador deste lado do mercado, o gestor do aeroporto. E como o aeroporto não possui concorrentes estratégicos por ser o único tomador de decisão do lado que recebe as propostas, não existe incentivo para ele manipular seus próprios resultados.

Quanto às restrições verificadas para o modelo DA-SLOT, elas são inerentes ao mecanismo *Deferred Acceptance* para mercados de dois lados, onde apenas dois conjuntos de preferências podem ser utilizados no processo de alocações de *slots*. Logo, no modelo apresentado, apenas dois jogadores podem participar do processo de alocação, sejam eles definidos como companhias aéreas e gestor do aeroporto, ou outros dois quaisquer. Além disso, nesta proposta, a utilização do modelo é limitada à apenas um aeroporto e uma pista. Para se trabalhar com mais pistas ou aeroportos, outros modelos devem ser explorados.

9.4 Desafios Encontrados

Inicialmente, a proposta em se utilizar a teoria dos jogos para resolver problemas da área do transporte aéreo é considerado um trabalho desafiador. Tal afirmação pode ser confirmada pela quantidade pequena de soluções propostas seguindo essa metodologia nos últimos anos (Seção 4.2). Entretanto, através de pesquisas mais extensas nessa área pode ser verificado que essa teoria e suas subáreas, como a teoria de *matching*, teoria *satisficing*, protocolos de *Rubinstein*, modelos de leilões, entre outros, podem ser consideradas uma tendência evolutiva no contexto do ATM (Tabela 4.1).

Um dos desafios iniciais foi o de encontrar uma ferramenta dentro da área da teoria dos jogos que pudesse ser aplicada ao problema em questão. O segundo desafio foi escolher qual dos mecanismos existentes utilizar, uma vez que cada processo possui características específicas com vantagens e desvantagens. O terceiro desafio foi transformar todo o processo CDM/GDP atual em um modelo de mercados de *matching*. E a última situação

relevante foi a obtenção de dados que pudessem ser utilizados junto ao modelo proposto, uma vez que parte dessas informações são de domínio estratégico das companhias aéreas.

A escolha do mecanismo de alocação foi definida através de uma proposta que permitisse a inclusão de um novo interveniente no processo de tomada de decisão colaborativa, neste caso, o gestor do aeroporto (DECEA, 2013). A modelagem do processo de alocação de *slots*, bem como as premissas de funcionamento da filosofia CDM, se fizeram possíveis através de trabalhos pioneiros da década de 1990 (Capítulo 4). E os dados utilizados nos estudos de caso desta proposta foram extraídos de sites na Internet, seja de órgãos do governo, para os movimentos aéreos, ou das empresas aéreas, para valores de passagem e tipos de aeronaves (ANAC, 2014; Azul, 2014; GOL, 2014; Infraero, 2014; Irvine, 2014; TAP, 2014).

9.5 Perspectivas e Trabalhos Futuros

Como direção futura para o trabalho apresentado nesta Tese, o modelo DA-SLOT pode ser modificado para permitir a entrada de qualquer outro *stakeholder* relevante, junto às companhias aéreas. O mecanismo DA permite o tratamento do conjunto de preferências de quaisquer dois conjuntos de jogadores (Roth e Sotomayor, 1989). Para o processo de alocação analisado, o modelo DA-SLOT foi construído de forma que as aeronaves são recursos das companhias aéreas e a pista, onde são definidos os *slots*, recurso do aeroporto. Mas nada impede que novos modelos incluam, por exemplo, a Torre de Controle, o Controle de Aproximação (APP), o Controle de Solo, e outros diferentes serviços do ATM.

Também é possível definir diferentes funções de *payoff* para cada conjunto dos jogadores, de forma a refletir os objetivos específicos de cada grupo. A análise de quais seriam as melhores estratégias para o cálculo das listas de preferências depende de cada cenário e merece um estudo à parte, contendo pesquisas específicas para esse fim (Ball *et al.*, 2010; Dib. *et al.*, 2007; Tumer e Agogino, 2008).

A presente proposta também é um passo inicial para a expansão da teoria de *matching* utilizando-se diferentes ambientes de mercados de dois lados. Desta forma, cenários otimizados podem ser modelados, permitindo o tratamento inicial de multipistas em aeroportos, e posteriormente, de multipistas em multiaeroportos. Além disso, os efeitos da alocação sobre as aeronaves podem ser analisados sob esses diferentes cenários, bem como, a manipulação de possíveis coalizões entre companhias aéreas.

Quanto à área da teoria dos jogos, novos estudos podem ser realizados com o objetivo de compreender melhor os jogadores, objetivos e interligação dos processos ATM. Por exemplo, existe a possibilidade de formação de coalizão entre jogadores de diferen-

tes lados, prejudicando o mercado. Uma prévia utilizando essas técnicas de análise foi realizada por Schummer e Rakesh (2013), a respeito da falta de incentivo na prestação de informações sobre voos cancelados. Tal situação pode levar à degradação do processo atual, onde *slots* úteis podem ficar vazios.

9.6 Considerações Finais

Através da estrutura do modelo DA-SLOT, baseada nas etapas do GDP, e da análise dos resultados apresentados ao longo do documento, vê-se que todos os objetivos propostos nesta Tese foram alcançados. Além das características desejáveis do próprio mecanismo de *matching*, com a implantação do modelo DA-SLOT verifica-se a possibilidade de alguns benefícios diretos para diversos *stakeholders* do CDM:

- **Unidades ATC:** atua como entidade reguladora do mercado, onde os níveis padrão de fluência e segurança dos voos são mantidos;
- **Gestores dos Aeroportos:** é assegurada a sua participação no processo de tomada de decisão, apoiando assim, a gestão e otimização dos recursos aeroportuários através de objetivos específicos, como: (a) o aprimoramento da fluência das aeronaves nas pistas, (b) a coordenação eficiente dos processos de aproximação e do movimento dos passageiros através dos portões de embarque;
- **Companhias Aéreas:** os resultados alcançados na eficiência da gestão podem contribuir para a redução dos custos operacionais com taxiamento, combustível, despesas com tripulação, e também, na redução do impacto ao meio-ambiente;
- **Passageiros:** apesar de não terem sido explicitamente incluídos no modelo DA-SLOT, entende-se que seus interesses são parcialmente tratados através da redução de atrasos e uma aproximação melhor dos horários de saída e chegada dos voos, respectivamente.

O processo de alocação de *slots* em situações críticas basicamente era executado segundo definições unilaterais das unidades de controle de tráfego aéreo (ATC). Em algum momento, entretanto, verificou-se que a falta de informações pontuais e fidedignas à respeito das aeronaves prejudicava o processo de tomada de decisão como um todo.

Assim, com a instituição do CDM, as companhias aéreas foram convidadas à participar do processo em troca do compartilhamento dessas informações, referentes à todas as aeronaves sob seu controle. E essa participação se deu com a construção dos Algoritmos *Ration-by-Schedule* e *Compression*, através de regras pré-definidas entre os participantes.

Além disso, decisões em tempo real também poderiam ser tomadas, com uma fase intermediária de Substituições e Cancelamentos (ver Figura 3.3). Assim, passou a existir o incentivo para a troca de informações compartilhadas do CDM.

Logo, entende-se que existe a possibilidade real de implementação de um modelo que permita a entrada de um novo *stakeholder* no processo de tomada de decisão, do ponto de vista técnico. Entretanto, do ponto de vista político e estratégico, deve existir um incentivo para que o controle ATC e as companhias aéreas permitam a entrada desse novo participante. Logo, dado o contexto histórico do CDM, é necessário que os aeroportos, na atual figura das concessionárias, caracterizem cada vantagem de sua participação para os demais participantes.

O trabalho realizado nesta Tese é apenas uma proposta para um dos muitos processos existentes no ATM. A principal expectativa com sua conclusão é que o foco das otimizações hoje realizadas nesta área não seja somente em cima da infraestrutura ou sistemas existentes, mas também sobre a atualização dos modelos e processos. A completa identificação dos *stakeholders* é tão importante quanto a correta definição de requisitos ou funcionalidades. Pois, segundo a própria filosofia do CDM, o compartilhamento de informações pode levar à melhores decisões no gerenciamento do tráfego aéreo.

Referências

- Abdulkadiroğlu, A. and Sönmez, T. (1999). House allocation with existing tenants. *Journal of Economic Theory*, 88(2):233–260. 4, 13, 44, 46
- Almeida, C. R. F., Weigang, L., and Meinerz, G. V. (2014). Satisficing collaborative decision making and controlling for airport management. *Proceedings of 10th IEEE/ASME Int. Conf. on Mechatronic and Embedded Systems and Applications-MESA*. 47, 48, 99
- ANAC (2014). HOTRAN - Transportation Schedule. Retrieved from <http://www2.anac.gov.br/hotran>. 83, 103
- Andreatta, G. and Romanin-Jacur, G. (1987). Aircraft flow management under congestion. *Transportation Science*, 21:249–253. 35, 48
- Arruda, J. A. C., Weigang, L., and Barros, A. (2012). Fairness analysis with flight cost impact using reinforcement learning approach. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, 8:9–27. 64
- Arruda Jr, A. C., Weigang, L., and Nogueira, K. B. (2014). Enhancement of airport collaborative decision making through applying agent system with matching theory. *Proceedings of 8th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation*. 3, 4, 47
- Azul (2014). Search flights. Retrieved from <http://www.voeazul.com.br/en/home>. 83, 103
- Balakrishnan, H. (2007). Techniques for reallocating airport resources during adverse weather. In *46th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2949–2956. 2, 10, 42, 43, 46, 48, 50, 100
- Ball, M., Donohue, G., and Hoffman, K. (2005). *Auctions for the safe, efficient, and equitable allocation of airspace system resources*. MIT Press, Cambridge. 10, 22, 42
- Ball, M., Hoffman, R., Odoni, A., and Rifkin, R. (2003). A stochastic integer program with dual network structure and its application to the ground-holding problem. *Operations Research*, 51:167–171. 2, 35, 36
- Ball, M. and Hoffman, R. L. (1998). *Collaborative decision making in air traffic management: A preliminary assessment*. University of Maryland, Institute for Systems Research. 22, 48

- Ball, M. O., Chen, C. Y., Hoffman, R. L., and Vossen, T. (2001). Collaborative Decision Making Air Traffic Management: Current and future research directions. In (eds.), B.-D.-O., editor, *New Concepts and Methods in Air Traffic Management*. Springer Verlag, 27, 42, 48
- Ball, M. O., Hoffman, R., and Mukherjee, A. (2010). Ground delay program planning under uncertainty based on the ration-by-distance principle. *Transportation Science*, 44(1):1–14. 1, 3, 103
- Bertsimas, D. and Stock-Paterson, S. (1998). The air traffic flow management problem with enroute capacities. *Operations Research*, 46(3):406–422. 35, 48
- Brasil, P. (2014). Infraero investments in the airports of the world cup host cities. Retrieved from <http://www.brasil.gov.br/centro-aberto-de-midia/news/infraero-investments-in-the-airports-of-the-world-cup-host-cities>. 77
- Brinton, C., Provan, C., Lent, S., Prevost, T., and Passmore, S. (2011). Collaborative departure queue management. In *9th USA Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, pages 1–12. 22, 24
- Butler, T. D. (1998). *Optimization Model with Fairness Objective for Air Traffic Management*. PhD thesis, University of Maryland, College Park. xiii, 1, 2, 3, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 51, 52, 91, 97
- Chan, C.-K., Chow, H. K., So, S. K., and Chan, H. C. (2012). Agent-based flight planning system for enhancing the competitiveness of the air cargo industry. *Expert Systems with Applications*, 39(13):11325–11334. 100
- Cheng, C.-H., Ho, S. C., and Kwan, C.-L. (2012). The use of meta-heuristics for airport gate assignment. *Expert Systems with Applications*, 39(16):12430–12437. 100
- Crespo, A. M. F. and Weigang, L. (Porto, 2010). Airspace complexity factor in ATFM scenario evaluation. In *14th Air Transport Research Society (ATRS) World Conference*, volume IIF, pages 1–12. 20, 21, 59
- Crespo, A. M. F., Weigang, L., and Barros, A. (2012). Reinforcement learning agents to tactical air traffic flow management. *International Journal of Aviation Management*, 1(3):145–161. 2
- Cruciol, L., Arruda, J., Weigang, L., Leihong, L., and Crespo, A. (2013). Reward functions for learning to control in air traffic flow management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 35:141–155. 3, 46, 48, 64
- DECEA (2013). Gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, uso flexível do espaço aéreo e decisão colaborativa. Retrieved from http://www.decea.gov.br/eventos/seminarioatm/wp-content/uploads/2013/10/CGNA_17-10.pdf. 3, 99, 103
- Delavar, M. R., Hajiaghahi-Keshteli, M., and Molla-Alizadeh-Zavardehi, S. (2010). Genetic algorithms for coordinated scheduling of production and air transportation. *Expert Systems with Applications*, 37(12):8255–8266. 100

- Dib., M. V. P., Weigang, L., and Melo, A. C. M. A. (2007). Approach of balancing of the negotiation among agents in traffic synchronization. *IEEE Latin America Transactions*, 5(5):338–345. xiii, 37, 38, 103
- Dubins, L. E. and Freedman, D. A. (1981). Machiavelli and the Gale-Shapley Algorithm. *American Mathematical Monthly*, 88(7). 93, 95, 96, 102
- Ergin, H. and Sönmez, T. (2006). Games of school choice under the boston mechanism. *Journal of Public Economics*, 90(1-2):215–237. 4, 19
- EUROCONTROL (2012). Airport cdm implementation. Technical Report version 4, European Organization for the Safety of Air Navigation. xiii, 23
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (2010). Airport collaborative decision making (A-CDM). Technical Report EC552/2004, Community specification for application under the Single European Sky Interoperability Regulation. 22
- Gai, A., Lebedev, D., Mathieu, F., Montgolfier, F., Reynier, J., and Viennot, L. (2007). Acyclic preference systems in P2P networks. In *13th International European Conference on Parallel and Distributed Computing*, pages 825–834. 19
- Gale, D. and Shapley, L. S. (1962). College admissions and the stability of marriage. *The American Mathematical Monthly*, 69(1):9–15. 2, 4, 12, 15, 16, 17, 51, 69, 89, 93, 96, 99, 101
- Genç, H. M., Erol, O. K., Eksin, I., Berber, M. F., and Guleryuz, B. O. (2012). A stochastic neighborhood search approach for airport gate assignment problem. *Expert Systems with Applications*, 39(1):316–327. 100
- Gil, A. C. (2008). *Como elaborar designs de pesquisa*. Atlas. 6
- GOL (2014). Choose your flight. Retrieved from <http://www.voegol.com.br/en-us/Paginas/default.aspx>. 83, 103
- Goldman, R. (2013). A-CDM in new york kjfk runway construction and impact on operations. *Advanced ATM Techniques Symposium and Workshops*. 23
- Gusfield, D. and Irving, R. W. (1989). *The Stable Marriage Problem: Structure and Algorithms*. MIT Press. 15, 16, 17, 93, 94, 101
- Hoffman, R. and Ball, M. O. (2000). A comparison of formulations for the single-airport ground-holding problem with banking constraints. *Operations Research*, 48(4):578–590. 35
- Hoffman, R. L. (1997). *Integer Programming Models for Ground-Holding in Air Traffic Flow Management*. PhD thesis, Department of Management Sciences, University of Maryland, College Park. 1, 2, 3, 22, 25, 27, 31, 36, 48, 91, 97, 100, 101
- ICAO (2005). Doc 9854: Global air traffic management operational concept. Technical Report DOC 9854-AN/458, International Civil Aviation Organization. 21, 25

- INFRAERO (2013). Concessão de aeroportos. Technical report, Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. 3
- Infraero (2014). Flights online - airport: Belo Horizonte - trancedo neves. Retrieved from <http://www.infraero.gov.br/portal/index.php/us.html>. xiv, 78, 83, 103
- Irvine, D. (2014). CNN Travel - How airlines make “less than \$6 per passenger”. Retrieved from <http://edition.cnn.com/2014/06/03/travel/how-airlines-make-less-than-6>. 83, 103
- Jo, G.-S., Jung, J.-J., and Yang, C.-Y. (1997). Expert system for scheduling in an airline gate allocation. *Expert Systems with Applications*, 13(4):275–282. 100
- Kuwata, Y. and Oohama, H. (1997). A case study of a real-time problem solving strategy in an air traffic control problem. *Expert Systems with Applications*, 12(1):71–79. 100
- Lulli, G. and Odoni, A. (2007). A model for the european air traffic flow management problem. *Transportation Science*, 41:1–13. 20, 35, 48
- Nisan, N. (2007). *Algorithmic game theory*. Cambridge University Press. xiv, 12, 13, 17, 18
- Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, E., and Vazirani, V. (2007). *Algorithmic Game Theory*. Cambridge University Press. 12, 43, 48, 101
- Nobel (2012). Stable matching: Theory, evidence, and practical design. The Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel 2012, Alvin E. Roth, Lloyd S. Shapley, Advanced Information. Retrieved from <http://www.nobelprize.org/nobel-prizes/economic-sciences/laureates/2012/advanced-economicsciences2012.pdf>. 11, 12
- Norin, A. (2008). *Airport Logistics: Modeling and Optimizing the Turn-Around Process*. PhD thesis, Department of Science and Technology, Linköping University, Norrköping, Sweden. xiii, 1, 2, 4, 41, 42, 48, 57
- Nozick, R. (2001). *Invariances: the structure of the objective world*. The Belknap Press of Harvard University Press. 95
- Odoni, A. R. (1987). The flow management problem in air traffic control. In Odoni, A. R., Bianco, L., and Szego, G. G., editors, *Flow Control of Congested Networks*, pages 269–288. Springer-Verlag. 35, 48
- Parkes, D. C., Kalagnanam, J., and Eso, M. (2001). Achieving budget-balance with vickrey-based payment schemes in exchanges. In *In Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 1161–1168. 45
- Pápai, S. (2000). Strategyproof assignment by hierarchical exchange. *Econometrica*, 68(6):1403–1433. 46
- Ramos, Z. M. M. D. (2007). *Estabilidade em Matchings e noutros Problemas de Atribuição. Algoritmos e comparação de soluções*. PhD thesis, Master in Mathematics for Teacher Education, FCUP, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto. 102

- Rassenti, S., Smith, V., and Bulfin, R. (1982). A combinatorial auction mechanism for airport time slot allocation. *Bell Journal of Economics*, 13(2):402–417. 42, 48
- Ribeiro, V. F. and Weigang, L. (2013). Collaborative decision making with game theory for slot allocation and departure sequencing in airports. In *17th Air Transport Research Society World Conference*. 10, 46, 48
- Roth, A. and Sotomayor, M. (1989). *Two-sided matching: A study in game-theoretic modeling and analysis*. Series: Econometric Society Monographs (Book 18), Cambridge University Press. 12, 15, 16, 18, 69, 89, 93, 94, 95, 96, 101, 102, 103
- Roth, A. E. (1982). The economics of matching: Stability and incentives. *Mathematics of Operations Research*, 7:617–628. 44, 95, 96
- Roth, A. E. and Peranson, E. (1999). The redesign of the matching market for american physicians: Some engineering aspects of economic design. *American Economic Review*, 89(4):748–780. 2, 4, 51
- Roth, A. E. and Postlewaite, A. (1977). Weak versus strong domination in a market with indivisible goods. *Journal of Mathematical Economics*, 4:131–137. 44
- Roth, A. E., Sönmez, T., and Ünver, M. U. (2004). Kidney exchange. *The Quarterly Journal of Economics*, 119(2):457–488. 2, 10, 13, 19, 51
- Schummer, J. and Rakesh, R. (2013). Assignment of arrival slots. *American Economic Journal: Microeconomics*, 5(2):164–85. xiv, 1, 2, 3, 4, 10, 33, 43, 45, 46, 48, 50, 53, 73, 78, 79, 100, 104
- Shapley, L. and Scarf, H. (1974). On cores and indivisibility. *Journal of Mathematical Economics*, 1(1):23–37. 4, 13, 43, 46
- Sönmez, T. and Ünver, M. (2011). Matching, allocation, and exchange of discrete resources. In Jess Benhabib, A. B. and Jackson, M. O., editors, *Handbook of Social Economics*, volume 1, pages 781–852. North-Holland. 2, 4, 10, 11, 12, 13
- Sutton, R. S. and Barto, A. G. (1998). Reinforcement learning: An introduction. *The MIT Press*. 39
- TAP (2014). Book your flight online. Retrieved from <http://www.flytap.com/USA/enus/Homepage>. 83, 103
- Timoszczuk, A. P., Pizzo, W. N., Staniscia, G. F., and Siewerdt, E. (2009). The SYN-CROMAX solution for air traffic flow management in brazil. *Computational Models, Software Engineering, and Advanced Technologies in Air Transportation: Next Generation Applications*. 57, 59
- Tumer, K. and Agogino, A. (2008). A adaptive management of air traffic flow: A multi-agent coordination approach. *AAAI’08. Proceedings of the 23rd national conference on Artificial Intelligence*, pages 1581–1584. 1, 2, 3, 35, 39, 48, 103

- Von Neumann, J. and Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press. 10
- Vossen, T. and Ball, M. (2006a). Optimization and mediated bartering models for ground delay programs. *Naval Research Logistics*, 53(1):75–90. xiii, 1, 2, 4, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 42, 45, 48, 85
- Vossen, T. and Ball, M. (2006b). Slot trading opportunities in collaborative ground delay programs. *Transportation Science*, 40(1):29–43. 2, 42, 48
- Weigang, L., Alves, C. J. P., and Omar, N. (1997). An expert system for air traffic flow management. *Journal of Advanced Transportation*, 31(3):343–361. 35
- Weigang, L., Dib, M., Alves, D., and Crespo, A. (2010). Intelligent computing methods in air traffic flow management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5):781–793. 21
- Wolfe, S. R., Jarvis, P. A., Enomoto, F. Y., Sierhuis, M., Putten, B., and Sheth, K. S. (2009). A multi-agent simulation of collaborative air traffic flow management. In Bazzan, A. L. C. and Klugl, F., editors, *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, pages 357–381. Information Science Reference. xiii, 1, 2, 4, 40, 41, 42, 48

Anexo A

Artigos Publicados

Como requisito parcial para a conclusão do curso de Doutorado em Informática na Universidade de Brasília (UnB), alguns artigos foram escritos e publicados em revistas especializadas , e outros aceitos e apresentados em congressos na área de Ciência da Computação e de Transportes. Uma lista dos trabalhos mais significativos é apresentada abaixo, sejam eles diretamente relacionados com esta Tese, ou indiretamente relacionados com os assuntos nela abordados.

A.1 Artigos completos publicados em periódicos

1. DE ARRUDA, ANTONIO CARLOS, WEIGANG, LI, MILEA, VIOREL. *A new Airport Collaborative Decision Making algorithm based on Deferred Acceptance in a two-sided market*. Expert Systems with Applications. Fator de Impacto(2013 JCR): 1,9650, v.42, p.3539 - 3550, 2015.
2. WEIGANG, L., TANG, CHAOSHENG, ARRUDA JUNIOR, A. C., LIU, P., ZHANG, YAMING. *A Study of Collaborative Decision Making in Air Transportation*. Complex Systems and Complexity Science, v.12, p.46 - 52, 2015.
3. CRUCIOL, LEONARDO L. B. V., DE ARRUDA, ANTONIO C., WEIGANG, LI, LI, LEIHONG, CRESPO, ANTONIO M. F. *Reward functions for learning to control in air traffic flow management*. Transportation Research. Part C, Emerging Technologies. Fator de Impacto(2013 JCR): 2,8200, v.35, p.141 - 155, 2013.
4. ARRUDA JUNIOR, A. C., WEIGANG, L., BARROS, A. G. *Fairness analysis with flight cost impact using reinforcement learning approach*. Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society. , v.8, p.9 - 27, 2012.

A.2 Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)

1. ARRUDA JUNIOR, A. C., WEIGANG, L., NOGUEIRA, K. B. *Enhancement of Airport Collaborative Decision Making through Applying Agent System with Matching Theory*. In: Eighth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation, Proceedings of 8th International Workshop on Agents in Traffic and Transportation. Vizzari, Kluegl, Vokrinek, 2014, Paris.
2. ARRUDA JUNIOR, A. C., WEIGANG, L., CRUCIOL, LEONARDO L. B. V. *A evolução da tomada de decisão colaborativa no gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo*. In: Seminário de Transporte Aéreo - SITRAER, São Paulo. Anais de SITRAER, 2014. v.1. p.1 - 9.
3. ARRUDA JUNIOR, A. C., WEIGANG, L. *Modelo de matching estável para tomada de decisão colaborativa na alocação de slots*. In: Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, Anais do XXVII ANPET, Rio de Janeiro, ANPET, 2013.
4. ARRUDA JUNIOR, A. C., LEITE, A. F., ALMEIDA, C. R. F., WEIGANG, L., CRESPO, A. M. F. *Análise de impacto no controle de fluxo de tráfego aéreo*. In: Anais do IX SITRAER Simpósio de Transporte Aéreo da SBTA, Manaus, 2010. v.1. p.355 - 362.
5. DE ARRUDA, ANTONIO C., LEITE, ALESSANDRO F., DE ALMEIDA, CICERO R. F., CRESPO, ANTONIO M. F., WEIGANG, L. *Fairness analysis with cost impact for Brasilia's Flight Information Region using reinforcement learning approach*. In: 2010 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2010), Funchal. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2010. v.1. p.539 - 544.
6. ARRUDA JUNIOR, A. C., LEITE, A. F., ALMEIDA, C. R. F., WEIGANG, L. *Modelo de análise de impacto para a região de informação de voo de Brasília (FIR-BS) utilizando sistema multi-agente e aprendizagem por reforço*. In: Anais de XXIV ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Salvador, 2010.
7. ALMEIDA, C. R. F., LEITE, A. F., ARRUDA JUNIOR, A. C., WEIGANG, L., CRESPO, A. M. F. *Modelo de balanceamento de fluxo de tráfego aéreo com múltiplos algoritmos de fluxo máximo*. In: IX SITRAER Simpósio de Transporte Aéreo da SBTA, Manaus. Anais do IX SITRAER, SBTA, 2010. v.1. p.154 - 162.

A.3 Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo expandido)

1. ARRUDA JUNIOR, A. C., LEITE, A. F., ALMEIDA, C. R. F., MELO, A. C. M. A., WEIGANG, L. *Impact Analysis Model for Brasília Area Control Center using Multi-Agent System with Reinforcement Learning*. In: The 22th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE 2010), 2010, Redwood City. Proceedings of SEKE 2010. , 2010. v.1. p.499 - 502