



**Universidade de Brasília**

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

**Decisão colaborativa com utilização de Teoria dos  
Jogos para o sequenciamento de partidas em  
aeroportos**

Vitor Filincowsky Ribeiro

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Programa de Pós-Graduação em Informática

Orientador  
Prof. Dr. Li Weigang

Brasília  
2013

Universidade de Brasília — UnB  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação  
Programa de Pós-Graduação em Informática

Coordenadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alba Cristina Magalhães Alves de Melo

Banca examinadora composta por:

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

Prof. Dr. Flávio de Barros Vidal — CIC/UnB

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Yaeko Yamashita — ENC/UnB

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Barros Paes — PUC/São Paulo

### **CIP — Catalogação Internacional na Publicação**

Ribeiro, Vitor Filincowsky.

Decisão colaborativa com utilização de Teoria dos Jogos para o sequenciamento de partidas em aeroportos / Vitor Filincowsky Ribeiro. Brasília : UnB, 2013.

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

Tese (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

1. *teoria dos jogos, alocação de slots, gerenciamento de partidas, CDM*

CDU 004

Endereço: Universidade de Brasília

Campus Universitário Darcy Ribeiro — Asa Norte

CEP 70910-900

Brasília–DF — Brasil



**Universidade de Brasília**

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

**Decisão colaborativa com utilização de Teoria dos  
Jogos para o sequenciamento de partidas em  
aeroportos**

Vitor Filincowsky Ribeiro

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Programa de Pós-Graduação em Informática

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

Prof. Dr. Flávio de Barros Vidal    Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Yaeko Yamashita  
CIC/UnB    ENC/UnB

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Barros Paes  
PUC/São Paulo

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alba Cristina Magalhães Alves de Melo  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Informática

Brasília, 27 de março de 2013

# Dedicatória

Dedico este trabalho àqueles que amam nosso grande País e se esforçam na promoção de seu crescimento.

Em especial, dedico este trabalho à minha avó Maria Misiak Filincowsky, que me deu um grande exemplo de valentia e perseverança. Que esta importante conquista venha trazer grandes alegrias à sua vida.

# Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Li Weigang, por sua confiança em meu trabalho e por seu investimento no meu crescimento acadêmico. Ao Prof. Maurício Bugarin, que prontamente concordou com meu ingresso em sua disciplina de Teoria dos Jogos, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Aos meus pais Josué e Eliane, irmãs e cunhados Lys, Nycole, Ronaldo e Timoteo, que com todo amor souberam compreender as horas em que estive distante. À amiga Ana Maria, que desde minha infância nunca mediu esforços para me apoiar. Aos colegas do TransLab, sempre cooperando para o crescimento do grupo. A Márcio Dias, meu chefe, por seu apoio e compreensão. Aos colegas da Fundação Ezute, pelo acompanhamento e suporte. Aos integrantes do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Brasília (DTCEA-BR), por sua colaboração e prestatividade.

Sobretudo, agradeço a Deus por seu eterno cuidado e fidelidade, sempre abundantes na minha vida.

# Resumo

A Tomada de Decisão Colaborativa (CDM) é um paradigma operacional no qual as decisões são baseadas em informações completas, atualizadas e compartilhadas entre todos os parceiros envolvidos no gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo (ATFM). No escopo aeroportuário, este compartilhamento de informações, valores e preferências agregam ao cenário uma maior qualidade quanto às decisões no gerenciamento das decolagens de aeronaves. Entretanto, no contexto operacional brasileiro da atualidade, esta tarefa depende exclusivamente da experiência do controlador, que, de maneira empírica, decide a alocação dos horários reais de partida para um sequenciamento adequado de decolagens das aeronaves que desejam ingressar no espaço aéreo.

Exposta esta limitação, a presente pesquisa foi concebida a fim de tratar o problema do gerenciamento de partidas em aeroportos. É proposta uma abordagem experimental de gerenciamento colaborativo de partidas com a utilização da Teoria dos Jogos, onde cada agente no modelo é uma aeronave a impactar o cenário das movimentações aéreas nos aeroportos sob análise. Esta nova modelagem é chamada de Gerenciamento Colaborativo de Partidas (CoDMAN). Esta abordagem se propõe a prover uma sequência eficiente de decolagens, fundamentada na negociação entre os agentes em um cenário dinâmico modelado com os princípios da Teoria dos Jogos e da Tomada Colaborativa de Decisão (CDM).

Um protótipo foi desenvolvido na linguagem C++ e as simulações foram elaboradas com base em planos de voo reais válidos para o Aeroporto Internacional de Brasília no mês de fevereiro de 2013. A interface com os sistemas radar foi simulada por meio do tratamento de todos os voos que causam impacto na TMA-Brasília para o referido período. Os resultados obtidos foram satisfatórios. As otimizações no sequenciamento das decolagens puderam reduzir o custo associado aos atrasos em até vinte e três por cento, comprovando a eficácia da modelagem proposta.

**Palavras-chave:** *teoria dos jogos, alocação de slots, gerenciamento de partidas, CDM*

# Abstract

Collaborative Decision Making (CDM) is an operational paradigm in which the decisions are based on complete, up-to-date and shared information among all the stakeholders involved in the Air Traffic Flow Management (ATFM). Within the airports operational scope, the sharing of information, values and preferences aggregate a greater quality to the scenario concerning the departure management. However, in the current Brazilian operational context, this task depends exclusively on the experience of the controller, who empirically decides the allocation of the actual departure times in order to achieve an adequate departure sequencing of the aircrafts that intend to enter the air space.

Due to such limitation, the current research was conceived in order to treat the departure sequencing problem in airports. An experimental approach to collaborative departure sequencing with application of Games Theory is proposed, where each one of the agents in the model is an aircraft that impacts the movement in the considered airports. This new modeling is called Collaborative Departure Management (CoDMAN). This approach is designed to provide an efficient departure sequencing based on the negotiation between the agents in a dynamic scenario modeled under Games Theory and CDM principles.

A prototype was developed in C++ language and the simulations were performed using actual flight plans valid to the International Airport of Brasília in February 2013. The interface with radar systems was simulated through the evaluation of all impacting flights in TMA-Brasília in the given period. The obtained results were satisfactory. The optimizations in the departure sequencing could reduce the cost associated to the delays up to twenty three percent, demonstrating the efficacy of the modeling herein proposed.

**Keywords:** *games theory, slot allocation, departure management, CDM*

# Abreviaturas

**A-CDM** - Tomada Colaborativa de Decisão em Aeroportos (*Airport Collaborative Decision Making*)

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

**ALDT** - Horário Real de Aterrissagem (*Actual Landing Time*)

**AHP** - Problema de Espera no Ar (*Airborne Holding Problem*)

**AFIL** - Plano de Voo Apresentado em Voo (*Flight Plan Filed in the Air*)

**AIBT** - Horário Real de Parada Total (*Actual In-block Time*)

**AIS** - Serviço de Informações Aeronáuticas (*Aeronautical Information Service*)

**ALDT** - Horário Real de Aterrissagem (*Actual Landing Time*)

**AMAN** - Gerenciamento de aterrissagens (*Arrival Management*)

**ANAC** - Agência Nacional de Aviação Civil

**AOBT** - Horário Real de Início de Movimentação (*Actual Off-Block Time*)

**APP** - Controle de Aproximação (*Approximation*)

**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** - Serviço de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Service*)

**ATOT** - Horário Real de Decolagem (*Actual Take Off Time*)

**AXIT** - Horário Real de *Taxi-In* (*Actual taXi-In Time*)

**AXOT** - Horário Real de *Taxi-Out* (*Actual taXi-Out Time*)

**CDM** - Tomada Colaborativa de Decisão (*Collaborative Decision Making*)

**CGNA** - Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea

**CINDACTA** - Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo

**CoDMAN** - Gerenciamento Colaborativo de Partidas (*Collaborative Departure Management*)

**CPVR** - Central de Planos de Voo Repetitivos

**CTA** - Área de Transferência de Controle (*Control Transfer Area*)

**CTOT** - Horário Calculado de Decolagem (*Calculated Takeoff Time*)

**CTR** - Zona de Controle (*Control Zone*)

**DECEA** - Departamento de Controle do Espaço Aéreo

**DMAN** - Gerenciamento de partidas (*Departure Management*)

**EIBT** - Horário Estimado de Parada Total (*Estimated In-block Time*)

**EOBT** - Horário Estimado de Início de Movimentação (*Estimated Off-Block Time*)

**ETOT** - Horário Estimado de Decolagem (*Estimated Takeoff Time*)

**EXIT** - Horário Estimado de *Taxi-In* (*Estimated taXi-In Time*)

**EXOT** - Horário Estimado de *Taxi-Out* (*Estimated taXi-Out Time*)

**FAA** - Administração Federal de Aviação (*Federal Aviation Administration*)

**FIFO** - Primeiro a chegar, primeiro a sair (*First in, first out*)

**FIR** - Região de Informação de Voo (*Flight Information Region*)

**FMC** - Células de Gerenciamento de Fluxo (*Flux Management Cell*)

**FPL** - Plano de Voo Eventual

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

**IATA** - Associação Internacional de Transporte Aéreo (*International Air Transport Association*)

**ICA** - Instrução de Comando Aeronáutica

**IEPV** - Impresso Especial de Proteção ao Voo

**IFR** - Regras de Voo Instrumentado (*Instrumented Flight Rules*)

**Infraero** - Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária

**IPV** - Instituto de Proteção ao Voo

**MAAD** - Módulo de Avaliação e Apoio à decisão

**MAPC** - Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário

**MBF** - Módulo de Balanceamento de Fluxo

**MCTOW** - Máximo Peso Certificado de Decolagem (*Maximum Certificated Takeoff Weight*)

**NOTAM** - Alerta para Pilotos (*Notice to Airmen*)

**PLN** - Plano de Voo

**RBS** - *Ration by Schedule*

**RPL** - Plano de Voo Repetitivo

**SAR** - Busca e salvamento (*Search and Rescue*)

**SiGePA** - Sistema de Gerenciamento de Partidas em Aeroportos

**SISSAR** - Sistema de Busca e Salvamento

**SISCEAB** - Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro

**SISCONFLUX** - Sistema de Aplicação e Gerenciamento das Medidas de Controle do Fluxo de Tráfego Aéreo

**SISDACTA** - Sistema de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo

**SRPV** - Serviço Regional de Proteção ao Voo

**SPV** - Sistema de Proteção ao Voo

**STMA** - Sistema de Telecomunicações do Ministério da Aeronáutica

**STVD** - Sistema de Tratamento e Visualização de Dados

**SYNCROMAX** - Sistema de Gestão e Fluência de Tráfego Aéreo

**TMA** - Área Terminal de Controle

**TOBT** - Meta de Tempo para Início de Movimentação (*Target Off-Block Time*)

**TransLab** - Laboratório de Modelo Computacional para Transporte Aéreo

**TSAT** - Meta de Tempo de Aprovação da Inicialização (*Target Start-up Approval Time*)

**TTD** - Meta de Horário para Decolagem (*Target Time for Departure*)

**TTOT** - Meta de Tempo de Decolagem (*Target Takeoff Time*)

**TWR** - Área de Controle de Torre (*Tower*)

**VFR** - Regras de Voo Visual (*Visual Flight Rules*)

# Lista de Figuras

2.1	Matriz de <i>payoffs</i> para os jogadores $P_1$ e $P_2$ . . . . .	9
2.2	Busca pelo Ótimo de Pareto no caso de quatro soluções locais . . . . .	11
2.3	Exemplo de formação de uma coalizão blocante. . . . .	13
2.4	Tomada de decisão por um agente em um jogo na forma extensiva. . . . .	16
2.5	Protocolo de Rubinstein para partilha monetária simples. . . . .	17
4.1	Estágios do processo de decolagem de uma aeronave. . . . .	30
4.2	Estágios de Partida com seus respectivos níveis operacionais. . . . .	32
4.3	Vórtices de turbulência em uma aeronave. . . . .	37
4.4	Exemplo de Plano de Voo Repetitivo. . . . .	41
4.5	Aeroportos coordenados no Brasil. Fonte: CGNA. . . . .	43
4.6	Regiões de Informação de Voo no Brasil . . . . .	44
6.1	Conflito entre duas aeronaves na tentativa de ocupação de um <i>slot</i> . . . . .	64
6.2	Fluxograma básico de alocação de <i>slots</i> . . . . .	65
6.3	Processo de percorrimento da fila de decolagens para negociação . . . . .	66
6.4	Árvore de negociação primordial entre duas aeronaves. . . . .	68
6.5	Modelo de Rubinstein adaptado ao CoDMAN. . . . .	69
7.1	Cenário de operação do sistema CoDMAN. . . . .	75
7.2	Diagrama de classes do sistema CoDMAN. . . . .	77
8.1	Carta do Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR). . . . .	90
8.2	Detalhamento da Região de Informação de Voo de Brasília (FIR-BS), com destaque para a TMA Brasília. . . . .	91

# Lista de Tabelas

4.1	Separação Radar aplicada a aeronaves em cruzeiro . . . . .	38
4.2	Separação utilizada para aeronaves em processo de aterrissagem ou decolagem na mesma trajetória de voo . . . . .	39
4.3	Movimento de aviões e de passageiros nos aeroportos brasileiros (em milhões de unidades) . . . . .	45
4.4	Aumento nas capacidades dos aeroportos brasileiros (em milhões de passageiros por ano) . . . . .	46
5.1	Perfil das decolagens antes e depois da utilização de CDM. . . . .	52
8.1	Infraestrutura do sítio aeroportuário do Aeroporto Internacional JK, em Brasília-DF. . . . .	89
8.2	Desempenho da fila primordial de decolagens em alocação estática. . . . .	92
8.3	Desempenho da fila de decolagens em alocação estática após procedimento de negociação. . . . .	93
8.4	Desempenho das aeronaves com alocação dinâmica de horário de partida. . . . .	94
8.5	Estatísticas de movimentação no aeródromo após a remoção de uma <i>runway</i> . . . . .	95
8.6	Avaliação da degradação do modelo quando uma <i>runway</i> é removida. . . . .	95
8.7	Estatísticas de movimentação no aeródromo após a adição de uma <i>runway</i> . . . . .	96
8.8	Otimização do modelo quando uma <i>runway</i> é adicionada. . . . .	96
8.9	Desempenho do cenário ao se equalizar o número de passageiros por aeronave. . . . .	97
8.10	Discriminação da quantidade de aeronaves com planos de voo repetitivos por companhias aéreas. . . . .	97
8.11	Resultados da simulação sem a influência do fator de carga nas negociações. . . . .	98
9.1	Comparação do desempenho dos resultados obtidos para a diminuição do custo total do cenário. . . . .	100

# Lista de Algoritmos

1	Negociação entre duas aeronaves . . . . .	80
2	Cálculo da melhor oferta . . . . .	82
3	Decisão pela aceitação da oferta . . . . .	84
4	Monitoramento das aeronaves a aterrissar . . . . .	86
5	Despacho de aeronaves para a TMA . . . . .	86

# Conteúdo

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Metodologia . . . . .	3
1.3.1 Teoria dos Jogos . . . . .	3
1.3.2 <i>Collaborative Decision Making</i> . . . . .	3
1.3.3 Metodologia de pesquisa . . . . .	3
1.4 Revisão dos trabalhos pertinentes . . . . .	4
1.5 Organização do documento . . . . .	5
<b>2 Noções sobre Teoria dos Jogos</b>	<b>6</b>
2.1 Conceitos básicos em Teoria dos Jogos . . . . .	6
2.1.1 Definições e terminologias . . . . .	7
2.1.2 Mecanismos de recompensas . . . . .	8
2.2 O Equilíbrio de Nash . . . . .	9
2.2.1 Estratégias mistas . . . . .	10
2.3 Ótimo de Pareto . . . . .	11
2.4 Jogos na forma coalizional . . . . .	11
2.4.1 Ciclos máximos de troca . . . . .	13
2.4.2 Algoritmo de Gale . . . . .	14
2.5 Jogos evolucionários . . . . .	14
2.5.1 Jogos na forma extensiva . . . . .	15
2.5.2 Protocolo de Rubinstein . . . . .	16
<b>3 Processos decisórios e CDM</b>	<b>19</b>
3.1 Utilidade esperada . . . . .	19
3.2 Processo decisório de Markov . . . . .	20
3.3 Tomada Colaborativa de Decisão - CDM . . . . .	21
3.3.1 Os quatro níveis do A-CDM . . . . .	22
3.3.2 Impactos do A-CDM nos parceiros envolvidos . . . . .	23

<b>4</b>	<b>Conceitos e considerações em ATFM</b>	<b>26</b>
4.1	Conceitos gerais . . . . .	26
4.1.1	Serviços de tráfego aéreo - ATS . . . . .	27
4.2	Gerenciamento de Tráfego Aéreo . . . . .	27
4.3	Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo . . . . .	28
4.4	As fases do voo IFR . . . . .	29
4.5	Restrições operacionais . . . . .	31
4.5.1	Controle de saturação . . . . .	31
4.5.2	Procedimentos pré-decolagem . . . . .	32
4.5.3	Separação entre as aeronaves . . . . .	35
4.6	Plano de voo . . . . .	38
4.6.1	Modalidades de planos de voo . . . . .	39
4.6.2	Facultabilidade na apresentação do plano de voo . . . . .	40
4.6.3	Formulário de Plano de Voo Repetitivo (RPL) . . . . .	40
4.7	O tráfego aéreo no Brasil . . . . .	41
4.7.1	Histórico . . . . .	42
4.7.2	Órgãos competentes . . . . .	42
4.7.3	Regiões de Informação de Voo . . . . .	44
4.8	Infraestrutura aeroportuária no Brasil . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Estado da arte em procedimentos de alocação</b>	<b>48</b>
5.1	<i>Slot Allocation</i> . . . . .	48
5.1.1	Modelo baseado em restrições ( <i>constraints</i> ) . . . . .	49
5.2	Procedimentos em A-CDM . . . . .	50
5.2.1	Experimentos em aeroportos selecionados . . . . .	52
5.3	RBS e <i>Compression</i> . . . . .	53
5.4	Teoria dos Jogos no transporte aéreo . . . . .	55
5.4.1	Planejamento estratégico . . . . .	55
5.4.2	Planejamento tático . . . . .	57
5.5	Problemas encontrados nas abordagens existentes . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Modelagem em Teoria de Jogos para o CoDMAN</b>	<b>59</b>
6.1	Teoria dos Jogos no Sistema CoDMAN . . . . .	59
6.1.1	Justificativa da abordagem metodológica . . . . .	60
6.1.2	Alocação colaborativa . . . . .	60
6.2	Modelagem do cenário . . . . .	61
6.3	Modelagem das aeronaves . . . . .	62
6.4	Negociação de <i>slots</i> . . . . .	63
6.4.1	Negociação de <i>slots</i> em jogos extensivos . . . . .	66
6.4.2	Adaptação do modelo truncado de Rubinstein . . . . .	68
6.4.3	Equilíbrio perfeito em subjogos . . . . .	70
<b>7</b>	<b>O Sistema de Gerenciamento Colaborativo de Partidas</b>	<b>73</b>
7.1	Descrição do sistema . . . . .	73
7.2	Requisitos operacionais . . . . .	74
7.2.1	Levantamento de requisitos . . . . .	74
7.2.2	Requisitos funcionais . . . . .	75

7.2.3	Metas de qualidade . . . . .	76
7.3	Implementação do protótipo . . . . .	76
7.3.1	Base de dados . . . . .	77
7.3.2	Classe Aircraft.cpp . . . . .	78
7.3.3	Classe Aerodrome.cpp . . . . .	78
7.4	Procedimentos de negociação . . . . .	79
7.4.1	Alocação da fila inicial . . . . .	79
7.4.2	Negociação de <i>slots</i> . . . . .	79
7.4.3	Concepção da oferta . . . . .	80
7.4.4	Avaliação da oferta . . . . .	83
7.5	Movimentação das aeronaves . . . . .	85
7.5.1	Processo de aterrissagem . . . . .	85
7.5.2	Processo de decolagem . . . . .	85
<b>8</b>	<b>Simulações e resultados</b>	<b>88</b>
8.1	Descrição do cenário . . . . .	88
8.2	Planejamento da simulação . . . . .	89
8.2.1	Caso 1: alocação estratégica . . . . .	90
8.2.2	Caso 2: alocação dinâmica . . . . .	91
8.2.3	Caso 3: redução de <i>runways</i> . . . . .	93
8.2.4	Caso 4: inclusão de <i>runways</i> . . . . .	94
8.2.5	Caso 5: sensibilidade ao volume de passageiros . . . . .	96
8.2.6	Caso 6: sensibilidade ao fator de carga da companhia aérea . . . . .	97
<b>9</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>99</b>
9.1	Avaliação dos resultados . . . . .	99
9.2	Avaliação da pesquisa . . . . .	101
9.2.1	Síntese dos objetivos alcançados . . . . .	101
9.2.2	Inovação e contribuição social . . . . .	101
9.2.3	Dificuldades enfrentadas . . . . .	102
9.3	Trabalhos futuros . . . . .	102
	<b>Referências</b>	<b>103</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Nos anos recentes, diversas pesquisas na área de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM - *Air Traffic Flow Management*) veem sendo empreendidas com bons resultados, atendendo suas expectativas pontuais. Um dos frutos destas pesquisas é o Sistema de Aplicação e Gerenciamento das Medidas de Controle do Fluxo de Tráfego Aéreo - SISCONFLUX [1], constituído dos módulos de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC) [2], Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF) [3] e Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD) [4]. No entanto, alguns problemas permanecem sem tratamento, ou ainda necessitam de atenção especial.

Dentre estes problemas, merece atenção o *Ground Holding Problem* (problema da espera em voo), situação na qual uma aeronave permanece em solo por um período superior ao planejado, uma vez que a esta seja aplicada alguma medida restritiva de controle de fluxo que a impede de levantar voo. Tal cenário causa atrasos indesejados e aumento significativo dos custos operacionais para as diversas companhias aéreas [5].

As medidas restritivas de controle de fluxo são aplicadas quando se deseja uma reconfiguração do espaço aéreo com o objetivo de otimizar o fluxo das aeronaves, garantindo-se que os voos sejam iniciados e completados com segurança dentro dos seus horários programados. Tendo em vista que as medidas restritivas são aplicadas de maneira empírica por parte do controlador, ainda cabe otimização, pois tal procedimento é apenas parcialmente eficaz.

### 1.1 Motivação

Atualmente, nas torres de controle de aeródromos, os controladores contam com sistemas que os auxiliam no gerenciamento do fluxo das operações de pouso e decolagem das aeronaves. No entanto, tais operações nos aeroportos brasileiros são feitas sem qualquer auxílio computacional à tomada de decisão quanto à ordem de partida e quanto aos tempos de separação entre pousos e decolagens. Tal tarefa depende exclusivamente da experiência do controlador [4].

Segundo a Infraero [6], estima-se que, até 2015, a movimentação de passageiros nos dez principais aeroportos brasileiros sofra um aumento de aproximada-

mente 39%<sup>1</sup>, não considerados ainda os dois mais importantes eventos esportivos do mundo, a serem sediados no Brasil: a Copa do Mundo de Futebol em 2014<sup>2</sup> e as Olimpíadas em 2016. Este grande volume nos aeroportos obviamente é acompanhado de uma intensa utilização da malha aérea brasileira, que recentemente enfrentou uma severa crise [7].

A aplicação de medidas restritivas às aeronaves é determinada com a finalidade de atender às prescrições regulamentares em vigor, de forma a impedir que os controladores de voo trabalhem com carga superior ao estabelecido em legislação, e tem severo impacto sobre todas as atividades operacionais e logísticas aeroportuárias [8]. Observando-se o atual cenário do tráfego aéreo do Brasil e a expectativa de sua demanda de utilização nos próximos anos, propõe-se um modelo computacional para gerenciamento de partidas em aeroportos.

Os sistemas de gerenciamento de chegadas (AMAN - *Arrival Management*) são desenvolvidos para o suporte ao gerenciamento de aterrissagens em aeroportos. Os sistemas AMAN devem atuar de maneira integrada com sistemas de gerenciamento de decolagens (DMAN - *Departure Management*) e, portanto, surge a necessidade da implantação de tal tecnologia.

Com isto em mente, o Translab, grupo de Pesquisa em Transporte Aéreo da Universidade de Brasília, deseja propor o embasamento teórico a ser utilizado na implementação de sistemas ATFM. O escopo deste trabalho é especificamente o desenvolvimento da modelagem CoDMAN (*Collaborative Departure Management*), que é um mecanismo computacional inteligente para o gerenciamento colaborativo de partidas em aeroportos utilizando conceitos de Teoria dos Jogos para a negociação entre as aeronaves envolvidas.

Uma importante motivação para que esta estratégia seja explorada é o fato de que ela não foi ainda atacada por nenhuma instituição acadêmica no Brasil. Alocação baseada em restrições (*Constraint Based Slot Allocation*), *Airport CDM*, *RBS (Ration by Schedule)* e *Compression* foram algumas das propostas já apresentadas pela comunidade científica para a solução do sequenciamento de partidas em aeroportos, mas apresentam algumas ineficiências, ou ainda deixam margem à otimização.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desta proposta de pesquisa é prover um mecanismo computacional para o gerenciamento eficiente de partidas de aeronaves nos aeroportos, ou seja, a proposição de uma modelagem capaz de realizar a alocação e ordenação eficiente das aeronaves na pista de decolagem. Os objetivos específicos são:

- Simulação dos cenários mais críticos encontrados para os aeroportos, de tal forma que possam ser projetados os cenários a serem enfrentados sob distintas condições de demanda.

---

<sup>1</sup>Tem-se como base a movimentação média de passageiros no ano de 2010.

<sup>2</sup>Este evento sempre é acompanhado da Copa das Confederações, realizada no ano antecedente.

- Desenvolvimento de um algoritmo para o escalonamento de decolagens utilizando abordagens de desenvolvimento baseadas nos princípios dos algoritmos *Ration by Schedule* e *Compression*;
- Elaboração de um algoritmo de *Slot Allocation* que utilize as técnicas de negociação entre agentes na Teoria dos Jogos para sequenciar a partida de aeronaves;

## 1.3 Metodologia

Os conceitos teóricos sob os quais o trabalho é desenvolvido consistem em duas principais técnicas: a Teoria dos Jogos e o CDM. Esta seção expõe uma descrição sucinta dos métodos de pesquisa e desenvolvimento utilizadas.

### 1.3.1 Teoria dos Jogos

A Teoria dos Jogos é a teoria matemática que estuda o comportamento estratégico de entidades (agentes, ou jogadores) que desejam receber alguma recompensa ao adotarem determinado perfil comportamental em um cenário de atuação específico. Na tentativa de maximizar esta recompensa, o agente decide quais estratégias deve utilizar, e com que probabilidade.

Na tarefa de alocar adequadamente uma sequência de decolagens, deve ser feita a análise individual de cada uma das aeronaves envolvidas no processo e colocá-las em uma fila de acordo com uma política de alocação. Naturalmente, é comum a existência de conflitos na ocupação pretendida de determinados *slots*<sup>3</sup>.

É possível visualizar tal concorrência como um cenário onde cada aeronave almeja sucesso mediante negociação com as demais. Deste modo, as aeronaves são modeladas como agentes em uma situação estratégica interativa. A Teoria dos Jogos mostra-se uma abordagem adequada para a modelagem deste quadro.

### 1.3.2 Collaborative Decision Making

O processo de alocação eficiente de *slots* deve contar com a atuação conjunta de todas as entidades impactadas, a fim de que esta operação seja realizada de maneira justa (com relação à distribuição dos atrasos). O compartilhamento de informação entre os agentes para a tomada de decisão é inerente a este cenário colaborativo. Assim sendo, é imprescindível a preocupação com a qualidade da informação disponibilizada, que deve ser completa e atualizada. Este processo colaborativo é efetivamente chamado de *Collaborative Decision Making*, ou simplesmente, CDM.

### 1.3.3 Metodologia de pesquisa

O trabalho é desenvolvido de acordo com a seguinte metodologia de pesquisa:

---

<sup>3</sup>O conceito de *slot* é discutido com mais detalhes na seção 5.1.

- *Levantamento de requisitos*: na etapa inicial, é feita a elicitação de requisitos junto aos usuários, que são os operadores da torre de controle. Também é feito o levantamento dos recursos necessários para o desenvolvimento.
- *Levantamento de informações*: são feitas reuniões junto aos usuários e aos órgãos de controle e gerenciamento de tráfego aéreo para compreender os procedimentos utilizados pelo controlador no cenário real, desejando-se realizar a coleta de dados para a modelagem do ambiente proposto pela pesquisa.
- *Levantamento do estado da arte*: alguns trabalhos relacionados são estudados, a fim de que se tenha uma visão abrangente a respeito das soluções já desenvolvidas e das técnicas utilizadas atualmente. Esta etapa da pesquisa é importante para que a implementação deste trabalho contemple problemas não verificados nas abordagens anteriores.
- *Definição da arquitetura*: com o escopo de atuação bem definido, o próximo passo é estabelecer a arquitetura do protótipo. São definidas a linguagem de implementação, as classes e estruturas de dados utilizadas, bem como a base de dados que irá simular a interação do sistema com o Sistema de Tratamento e Visualização de Dados, operado pela Força Aérea Brasileira.
- *Implementação*: a implementação do protótipo segue as definições anteriores. A metodologia estudada será aplicada no tratamento algorítmico do problema apresentado.
- *Simulação*: são definidos os casos de teste da simulação e os respectivos subconjuntos de dados a serem utilizados em cada caso. A simulação é executada de acordo com o que se espera encontrar na realidade. Os dados são coletados e armazenados para apreciação.
- *Análise dos resultados*: após as simulações, os dados obtidos são compilados e analisados minuciosamente, a fim de que se tenha uma estimativa da eficiência do modelo proposto. São levantados os êxitos e deficiências do modelo e é provida a avaliação final do protótipo.

## 1.4 Revisão dos trabalhos pertinentes

Diversas propostas para a otimização da malha aérea e do tráfego aéreo já foram apresentadas à comunidade científica. Naturalmente, cada estratégia tem fundamentação teórica suficiente para a crença em sua viabilidade. Contudo, à medida em que novas técnicas e/ou recursos computacionais são descobertos, surge a necessidade da adequação destas abordagens. O sistema SISCONFLUX, em desenvolvimento pelo TransLab na Universidade de Brasília, propõe a implementação das tarefas de previsão de cenário, balanceamento de fluxo e apoio à decisão [1].

As metodologias para cálculo de ocupação do espaço aéreo possuem excelentes resultados demonstrados em modelos cinemáticos, tais como o Sistema de Simulação Acelerado, proposto por Alexandre Gonzaga [9] e o Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário, proposto por Ribeiro *et al* [10]. Os modelos para balanceamento de fluxo de tráfego utilizam a teoria dos grafos para modelar o espaço

aéreo, conforme o proposto por Bueno Souza [3]. Já as abordagens para auxílio à tomada de decisão consistem em técnicas de inteligência artificial, como por exemplo sistemas multiagentes, utilizados por Marcos Dib [11] e o aprendizado por reforço, proposto por Antonio Carlos Arruda [12] e pelo Maj. Aviador Antônio Crespo [4].

## 1.5 Organização do documento

No Capítulo 2, é exposta a fundamentação teórica dos conceitos explorados. O comportamento de agentes em interações estratégicas é descrito e é fornecido um breve estudo da Teoria dos Jogos, um dos pilares teóricos deste trabalho. As situações de Equilíbrio Nash e Ótimo de Pareto são apresentadas e é elaborada a diferenciação conceitual entre ambas. É estudado também o Protocolo de Rubinstein para ofertas alternadas.

No Capítulo 3, são elucidados importantes conceitos concernentes ao processo de tomada de decisão. São introduzidos os conceitos de utilidade esperada e processos estocásticos. A tomada colaborativa de decisão (CDM) é apresentada em detalhes, com o aprofundamento da metodologia aplicada ao escopo aeroportuário.

O Capítulo 4 explicita algumas noções conceituais a respeito do tráfego aéreo. São expostos os conceitos gerais nesta modalidade de transporte e é feita a diferenciação entre Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM) e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM). São descritas também as diversas fases de operação de um voo e o documento que publica sua intenção de execução - o Plano de Voo. Além do mais, é apresentado ao leitor um panorama do tráfego aéreo no Brasil.

O Capítulo 5 apresenta alguns trabalhos relevantes como estado da arte na modelagem de problemas de gerenciamento de tráfego aéreo. São expostos os êxitos e as deficiências encontrados nas presentes implementações, com uma análise sucinta dos resultados obtidos por meio destas implementações.

O Capítulo 6 descreve detalhadamente a modelagem matemática para a formalização do mecanismo de negociações. São discriminados os agentes do modelo e apresentados os seus atributos e sua percepção do cenário em termos do cálculo de sua função de recompensa. Os aspectos metodológicos da construção do cenário também são expostos, sendo detalhada a influência que cada agente exerce sobre o mesmo.

O Capítulo 7 é desenvolvido a fim de apresentar efetivamente a arquitetura do CoDMAN. São elicitados os requisitos formais para a construção do protótipo e os algoritmos desenvolvidos são estudados. Ainda, são apresentadas as principais classes e métodos desenvolvidos.

A descrição dos procedimentos de simulação, o ambiente de desenvolvimento e execução e as bases de dados utilizadas são apresentados no Capítulo 8. Ainda neste capítulo, são averiguados os resultados obtidos e é elaborada a análise dos mesmos.

Por fim, o Capítulo 9 aborda os resultados frente aos objetivos propostos, com as considerações finais da implementação. São introduzidas também algumas propostas de trabalhos futuros e eventuais melhorias ao modelo apresentado.

# Capítulo 2

## Noções sobre Teoria dos Jogos

É possível resumir um jogo meramente como um ambiente que conta com a atuação de um ou mais agentes que, com base em estímulos e interesses, decidem por tomar ações que lhes tragam a maior vantagem possível. É necessária a compreensão do processo de tomada de decisão e o tratamento de conflitos entre os agentes.

Os princípios nos quais esta dinâmica se desenrola são apresentados neste capítulo. Na seção 2.1, é tratada a Teoria dos Jogos, que define o comportamento estratégico de agentes dentro de determinado cenário e seus mecanismos de recompensa. A seção 2.2 introduz o conceito de equilíbrio, expondo a existência do Equilíbrio de Nash e a utilização de estratégias mistas. A seção 2.3 completa o entendimento a respeito de soluções a um jogo com a apresentação do Ótimo de Pareto.

Os jogos na forma coalizional, fundamentados na ação conjunta dos agentes, são tratados na seção 2.4. Por fim, os jogos dinâmicos são estudados em sua estrutura evolucionária na seção 2.5, que também descreve a representação do jogo na forma extensiva e o protocolo de barganha de Rubinstein para distribuição de recompensas.

### 2.1 Conceitos básicos em Teoria dos Jogos

O comportamento estratégico é o cerne das interações em um ambiente complexo multiagentes. Qualquer cenário interativo envolve a aquisição, transferência, distribuição ou perda de recursos por parte dos agentes nele inseridos. Percebe-se que qualquer ação tomada por um indivíduo, ou grupo de indivíduos, tem como consequência determinado efeito no cenário, inclusive nos demais atores racionais. Naturalmente, deseja-se que este efeito seja sempre positivo para a entidade que escolheu agir daquela maneira.

A Teoria dos Jogos é o estudo formal de tomada de decisão onde diversos agentes, ou jogadores, necessitam fazer escolhas que potencialmente afetam os interesses dos demais [13]. Tenta-se através da Teoria dos Jogos estabelecer uma abordagem matemática para conflitos de interesse ou cooperação em situações interativas.

Tais conceitos podem ser aplicados sempre que as ações de agentes forem interdependentes. Os agentes podem ser indivíduos ou conjuntos, constituindo enti-

dades que necessariamente devem adotar um comportamento dentro do jogo, tentando prever as ações dos demais agentes para se obter o resultado desejado. Neste modelo, a progressão de um estado a outro consiste na decisão de um ou mais agentes ou do resultado de certo evento probabilístico.

### 2.1.1 Definições e terminologias

Esta seção apresenta algumas definições inerentes à Teoria dos Jogos, pois a familiaridade com os conceitos teóricos em questão é imprescindível para a modelagem matemática desenvolvida neste trabalho.

1. *Jogos de  $n$ -jogadores*: um jogo dentro da Teoria dos Jogos é simplesmente uma descrição formal de uma situação estratégica. John Nash introduziu o conceito de jogos de  $n$ -jogadores ( *$n$ -person games*), onde cada jogador é um agente em um dado ambiente, possuindo um conjunto finito de estratégias puras [14]. Estas estratégias dependem de informações que não estão sob o controle do agente.
2. *Estratégias*: uma estratégia é qualquer ação possível para um jogador. No escopo do jogo, a estratégia é um plano completo de escolhas para cada ponto de decisão por parte do jogador. As *estratégias puras* são simplesmente uma definição completa de como o jogador vai atuar no jogo. Ou seja, determinam os movimentos do jogador para cada situação que este venha a enfrentar. A estas estratégias puras, está associado um conjunto de *estratégias mistas*. Uma estratégia mista é uma distribuição probabilística a respeito de uma decisão, o que estabelece randomização ativa, à qual está associada uma probabilidade, que determinará a decisão do jogador [15].
3. *Função de utilidade*: cada situação no jogo pode ser mapeada em um número real (*payoff*) que expressa a preferência ou interesse do jogador. Este mapeamento é definido por uma *função de utilidade*  $u(s)$  [16]. Assim sendo, a atitude do jogador frente ao cenário encontrado em dado momento deve ser tal que sua função de utilidade seja maximizada, tornando o próximo cenário o mais favorável possível.
4. *Jogos finitos*: A um jogo de  $n$ -jogadores onde  $n$  é finito, bem como o conjunto de estratégias puras de cada jogador, dá-se o nome de *jogo finito*.
5. *Jogos de soma-zero*: Um jogo de soma-zero é aquele para o qual o ganho de um jogador é consequência da perda de outros. Isto define a situação onde o aumento da função de utilidade de um jogador acarreta a diminuição da função de utilidade de outros jogadores. Deste modo, um jogo de soma-zero é aquele onde a soma dos *payoffs* dos jogadores é nula. Assim, os interesses dos jogadores neste jogo são diametralmente opostos [13]. No caso de jogos de soma não-zero, a existência de jogadores vencedores não implica que existam perdedores.
6. *Jogos não-cooperativos*: Esta modalidade de jogo descreve a situação na qual cada agente busca exclusivamente maximizar seus ganhos. Não há qualquer

comunicação entre os jogadores e, portanto, eles não colaboram uns com os outros. Como cada agente busca o benefício próprio, em algum momento haverá conflitos de interesses entre os jogadores. É importante também estabelecer a diferença entre os jogos não-cooperativos e os jogos estritamente competitivos, sendo neste último caso a situação onde se busca a derrota de outrem. Para exemplificar estas diferenças, seguem duas situações:

- A formulação de estratégias de marketing para o lançamento de um produto faz parte de um jogo não-cooperativo. Nestas tarefas, constam a definição do preço de venda, ataque ao público-alvo, localização da unidade comercial etc. O lançamento deste produto pode impactar a concorrência, mas o objetivo não é necessariamente eliminá-la, e sim aumentar os lucros da empresa.
- Uma partida de *poker* é um jogo estritamente competitivo, pois o ganho de um jogador implica na perda dos demais.

7. *Jogos cooperativos*: Nash descreve um jogo cooperativo como sendo um conjunto de jogadores, estratégias puras e *payoffs*, de modo que os jogadores irão colaborar uns com os outros, sendo possível ainda a comunicação entre eles de modo a formarem coalizões arbitradas [15]. Neste modelo, o árbitro seria meramente uma unidade de controle. Ainda, pode existir a transferência de *payoffs* entre os jogadores, de modo que haja comparação entre os mesmos.

### 2.1.2 Mecanismos de recompensas

Em cenários menos sofisticados, os agentes podem simplesmente utilizar o seu sistema de recompensas diretamente. Este sistema pode ser uma tabela ou matriz de ganhos pré-fixados, onde as ações são mapeadas em valores discretos. Em cenários mais complexos, é interessante prover aos agentes um mecanismo de recompensas locais que aumentem sua habilidade em aprender novas políticas de atuação [17]. Esta definição não é trivial quando o ambiente em questão apresenta espaços de estados contínuos ou onde o jogo é dinâmico ou estocástico.

Um mecanismo de recompensas eficiente deve promover a coordenação entre os agentes dentro do espaço de estados do domínio, sendo que cada um destes agentes tem o objetivo de aprender a maximizar sua utilidade. Como consequência, a utilidade do cenário como um todo aumenta à medida em que as utilidades individuais também são maximizadas. Logo, o agente ainda é responsável pela qualidade de suas decisões, que se refinam conforme o jogo evolui.

O primeiro passo é alinhar os *payoffs* dos agentes com a utilidade global. Esta premissa é importante no sentido de limitar as ações dos agentes, uma vez que, ao tentar maximizar sua utilidade, algum agente poderia porventura comprometer o desempenho global. Ainda, o mecanismo de recompensas deve ser sensível sobretudo às ações dos agentes em particular, pois a influência de um agente específico no cenário se torna menor à medida em que mais agentes são adicionados ao modelo.

Uma maneira de contornar a dificuldade inerente aos espaços de estados contínuos é encontrar um sistema de recompensas também contínuo. Esta tarefa pode

ser realizada por uma função de utilidade bem definida, derivável dentro do dito espaço de estados. De fato, se a relação de preferências é contínua, existe uma função real que pode ser usada para representá-la. De outro modo, o espaço de estados seria discreto e, portanto, o mecanismo de recompensas também seria [18].

## 2.2 O Equilíbrio de Nash

O agente faz uso de seu conjunto de estratégias para adotar uma que lhe proporcione um resultado ótimo em um dado instante do jogo. Assim, considerando as estratégias  $s_1$  e  $s_2$  do conjunto de estratégias do jogador  $P_i$ , diz-se que a estratégia  $s_1$  *domina* a estratégia  $s_2$  se, dada qualquer combinação das estratégias dos demais jogadores, a escolha por  $s_1$  trará invariavelmente melhores resultados do que a escolha por  $s_2$ . Nesta situação,  $s_2$  é *dominada* por  $s_1$ . Chama-se de *jogador racional* aquele que jamais escolhe adotar uma estratégia dominada [13].

O *Equilíbrio de Nash* é a situação onde, dado um determinado conjunto de estratégias, um para cada jogador, cada escolha adotada pelos jogadores é a melhor resposta à escolha dos outros  $n-1$  jogadores, ou seja, se cada um apresentasse simultaneamente suas estratégias, nenhum deles iria desejar reconsiderar a estratégia utilizada [19]. Deste modo, nenhum jogador pode unilateralmente alterar sua estratégia e obter um *payoff* mais interessante. Portanto, pode-se entender o equilíbrio de Nash como um conceito de solução central para o jogo em equilíbrio estratégico.

A figura 2.1 apresenta uma matriz de ganhos para um jogo estático entre dois jogadores, sendo que os valores  $s_{1i}$  são as estratégias do jogador 1 e  $s_{2j}$  são as estratégias do jogador 2. Cada valor  $(x, y)$  nesta matriz é o ganho obtido pelos jogadores ao ser escolhido o perfil estratégico  $(s_{1i}, s_{2j})$ . É possível observar os perfis estratégicos e os *payoffs* para a utilização de cada perfil, sendo destacado o único equilíbrio de Nash deste jogo. Uma leitura simples desta matriz permite visualizar que nenhum dos dois jogadores irá aumentar seu *payoff* caso decida mudar a estratégia adotada.

		$P_2$		
		$s_{21}$	$s_{22}$	$s_{23}$
$P_1$	$s_{11}$	72, 72	60, 80	42, 77
	$s_{12}$	80, 60	64, 64	40, 55
	$s_{13}$	77, 42	55, 40	22, 22

Figura 2.1: Matriz de *payoffs* para os jogadores  $P_1$  e  $P_2$ .

Se o jogo for arbitrado, é possível que sejam apresentadas sugestões estratégicas aos jogadores. Se dada sugestão não for um Equilíbrio de Nash, algum jogador pode desejar escolher uma outra estratégia e obter um melhor *payoff*, considerando

que todos os demais acataram a sugestão. Neste contexto, o Equilíbrio de Nash pode ser interpretado como um ponto de estabilidade em um ajuste dinâmico de comportamentos onde as saídas individuais são sempre ótimas, dada a aceitação da sugestão estratégica por todos os agentes participando do jogo. Portanto, nenhum jogador racional desejará alterar a sua estratégia se o jogo já estiver em estado de equilíbrio [19].

Para jogos na forma normal, a solução consiste na busca de um perfil estratégico correspondente a uma maneira natural de se jogar. Ainda, em um jogo estático com informação completa, tem-se que cada jogador conhece os *payoffs* dos demais, para cada perfil de estratégias possível. Deste ponto, é possível prever o comportamento dos jogadores, partindo-se da premissa de que, se um jogador escolher uma estratégia que não faça parte do equilíbrio, o mesmo estaria cometendo um erro, mesmo que tal jogador não conheça *a priori* as decisões tomadas pelos demais agentes do jogo. Este conhecimento comum reforça o sentido de *racionalidade*, uma vez que o jogador  $P_i$  sabe que os demais são racionais, e que estes adversários também sabem que  $P_i$  é racional.

## 2.2.1 Estratégias mistas

Uma *estratégia mista* de um jogador  $P_i$  é uma coleção de números não-negativos que correspondem um-a-um às estratégias puras  $\pi_{i\alpha}$  de  $P_i$ , tais que:

$$s_i = \sum_{\alpha} c_{i\alpha} \pi_{i\alpha} \quad (2.1)$$

onde  $c_{i\alpha} \geq 0$  e  $\sum_{\alpha} c_{i\alpha} = 1$ . Nesta notação,  $\pi_{i\alpha}$  é a  $\alpha$ -ésima estratégia pura do jogador  $P_i$ , que é utilizada com uma probabilidade  $c_i$ .

A equação 2.1 simplesmente elucida que uma estratégia mista é a associação de uma probabilidade a uma estratégia pura  $\pi_{i\alpha}$ , constituindo-se assim uma estratégia não-determinística. A partir deste ponto, é possível definir a  $n$ -tupla de estratégias mistas  $\sigma = (s_1, s_2, \dots, s_n)$  e a função  $u_i(\sigma) = u_i(s_1, s_2, \dots, s_n)$ , onde  $u_i(\sigma)$  é a função de utilidade (*payoff*) associada às estratégias mistas do jogador  $P_i$ .

Nash estabelece ainda a notação de substituição para  $\sigma = (s_1, s_2, \dots, s_n)$  como sendo  $(\sigma; r_i) \rightarrow (s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, r_i, s_{i+1}, \dots, s_n)$ , onde  $r_i$  é uma estratégia mista qualquer. Deste modo, a  $n$ -tupla  $\sigma$  é um ponto de equilíbrio se, e somente se,

$$u_i(\sigma) = \max_{r_i} [u_i(\sigma; r_i)] \quad (2.2)$$

A equação 2.2 implica que um ponto de equilíbrio é uma  $n$ -tupla  $\sigma$  tal que a estratégia mista de cada jogador maximiza sua função de utilidade se as estratégias dos demais jogadores forem mantidas [15]. Ainda, a estratégia mista pode fazer uso da estratégia pura  $\alpha$ , de modo que  $u_{i\alpha}(\sigma) = u_i(\sigma; \pi_{i\alpha})$ . Ou seja, é condição necessária e suficiente que

$$u_i(\sigma) = \max_{\alpha} u_{i\alpha}(\sigma) \quad (2.3)$$

para que  $\sigma$  seja um ponto de equilíbrio, ou como popularmente difundido entre os pesquisadores, um Equilíbrio de Nash.

## 2.3 Ótimo de Pareto

Em algumas modalidades de jogos, são consideradas soluções multiobjetivo. Desta maneira, a solução imprime ao jogo um estado onde nenhum ótimo local pode ser melhorado sem que as demais soluções sejam prejudicadas, alcançando-se então uma solução global. Este estado é conhecido como *Ótimo de Pareto* [20].

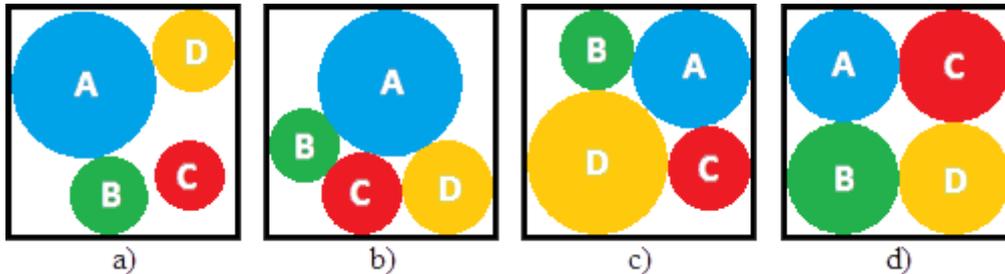


Figura 2.2: Busca pelo Ótimo de Pareto no caso de quatro soluções locais

A figura 2.2 ilustra um exemplo de um jogo multiobjetivo. O objetivo das entidades A, B, C e D é maximizar sua área dentro do quadrado. No quadrado (a), a entidade C ainda pode aumentar sua área sem que a área de A, B e D seja diminuída, mostrando que o cenário ainda não apresenta um Ótimo de Pareto. Já nos quadrados (b), (c) e (d), não cabe mais otimização, pois todas as entidades já possuem sua área máxima, dadas as áreas das demais entidades. Assim, ao se averiguar uma ineficiência na optimalidade de Pareto para certo modelo, surge a necessidade de uma reavaliação estratégica, uma vez que algumas oportunidades são sub-aproveitadas.

Ainda na figura 2.2, vale observar que o quadrado (d) é uma solução ótima global, se a função objetivo for a máxima área possível ocupada com a combinação das áreas de A, B, C e D, configurando inclusive um equilíbrio de Nash para este jogo. Este fato ainda introduz a noção de *função objetiva global*. A existência de tal função determina que haja um esforço conjunto das entidades envolvidas para que a mesma seja maximizada.

É notória aqui a associação entre *metas* e *restrições* de um modelo. Toda evolução entre estados do jogo, a fim de satisfazer um objetivo, passa pelo crivo de determinadas restrições ou limitações. Tais restrições podem eventualmente ser relaxadas em estados posteriores. Outro importante ponto na busca de uma solução é a distinção entre *validade* e *optimalidade*. A compreensão destes dois conceitos é necessária para a construção de eventuais mecanismos de revisão estratégica, uma vez que determinadas decisões ou ações podem ser tomadas por razões que posteriormente se tornam inválidas, todavia sem que isto afete a plausibilidade de tais ações [20].

## 2.4 Jogos na forma coalizional

Em um jogo cooperativo, é admitido que os jogadores formem coalizões, de modo a tomar decisões conjuntas de forma coordenada. Assim sendo, a coalizão passa a

exercer o papel de um único agente coeso, onde cada agente se compromete a atuar de modo a acatar a decisão tomada pela própria coalizão. Como consequência, o resultado do jogo é repartido entre todos os agentes [21].

No entanto, podem surgir ocasiões onde o produto resultante para a coalizão não é infinitamente divisível, ou seja, não há utilidade transferível<sup>1</sup>. Um jogo com estas características é modelado por  $(P, X, V, (\succeq_i)_{i \in N})$ , onde:

- $P$  é um conjunto de jogadores  $p_i$ , onde  $i = 1, \dots, n$ ;
- $X$  é o conjunto de todos os resultados possíveis;
- $V : 2^P \rightarrow 2^X$  é a função característica;
- $\succeq_i$  é uma relação de preferências definida sobre os resultados em  $X$ , para cada jogador  $i$ ;
- $S$  é uma coalizão de jogadores que permutam seus bens entre si;
- $V(S) \subseteq X$  é o conjunto dos resultados que podem ser alcançados pela coalizão  $S$ , ou seja, conjunto para os quais  $S$  é efetiva.

Cada jogador inicialmente possui um bem indivisível e tem uma relação de preferências estritas ou não-estritas  $\succeq_j$  sobre os bens a serem distribuídos. Tal relação é completa e transitiva, englobando todos os bens do universo de possibilidades [22]. Deste modo, uma permutação dos bens entre os agentes é definida como sendo uma *alocação válida*. Um exemplo do funcionamento deste modelo pode ser visto a seguir, onde os jogadores  $p_i$  expressam suas preferências pelos bens  $s_i$ <sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} p_1 &: s_2 \succ_1 s_3 \succ_1 s_1 \\ p_2 &: s_1 \succ_2 s_2 \succ_2 s_3 \\ p_3 &: s_3 \succ_3 s_1 \succ_3 s_2 \end{aligned}$$

Dado o conjunto  $S \subseteq F$ , onde  $F$  é o conjunto de todos os jogadores e  $S$  é uma coalizão formada a partir de elementos de  $F$ , diz-se que as transações em  $S$  são *estáveis* se nenhum dos agentes envolvidos em  $S$  é parte de uma coalizão blocante, ou seja, se nenhuma transação de troca em uma alocação entre os elementos de  $S$  precisa ser desfeita no caso de os agentes alcançarem o equilíbrio. Se uma alocação não estiver no núcleo de soluções desta negociação, coalizões blocantes são formadas por agentes que não conseguiram efetuar a troca.

Observe o próximo exemplo, considerando que o bem  $s_i$  está inicialmente alocado para o jogador  $p_i$ :

$$\begin{aligned} p_1 &: s_2 \succ_1 s_3 \succ_1 s_1 \succ_1 s_4 \\ p_2 &: s_1 \succ_2 s_2 \succ_2 s_4 \succ_2 s_3 \\ p_3 &: s_4 \succ_3 s_3 \succ_3 s_2 \succ_3 s_1 \\ p_4 &: s_2 \succ_4 s_1 \succ_4 s_4 \succ_4 s_3 \end{aligned}$$

<sup>1</sup>Este é o caso dos *slots* de partida em questão neste estudo.

<sup>2</sup> $s_i \succ s_j$  equivale a dizer que o bem  $s_i$  é preferível ao bem  $s_j$ .

Este caso culminará na formação de uma coalizão blocante, uma vez que os jogadores  $p_1$  e  $p_2$  conseguirão efetuar a troca de acordo com a priorização de suas preferências, enquanto que  $p_3$  e  $p_4$  conservarão sua alocação inicial. Deste modo, o núcleo do jogo é  $u(p_1, p_2, p_3, p_4) = \{(s_2, s_1, s_3, s_4)\}$ . Este resultado é visualizado na figura 2.3, onde percebe-se que  $p_1$  e  $p_2$  permutam os seus bens, enquanto  $p_3$  e  $p_4$  não conseguem efetuar nenhuma troca com qualquer outro jogador.

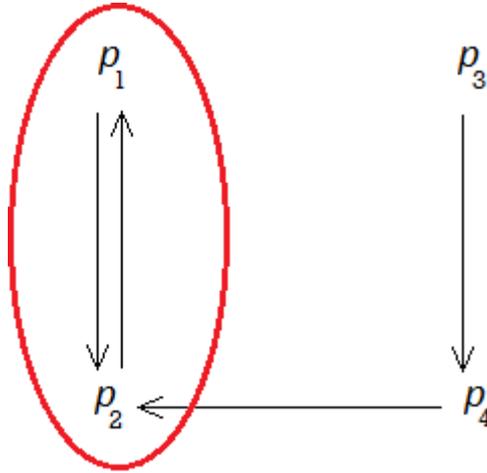


Figura 2.3: Exemplo de formação de uma coalizão blocante.

Pode-se perceber também que o núcleo de um jogo na forma coalizional é sempre não-vazio. Esta afirmação parte do princípio de que qualquer alocação não presente no núcleo é dominada por outra alocação simples que mantém todas as alocações estáveis originais, contando com a formação de coalizões entre os agentes que não participaram das trocas anteriores. Por conseguinte, estas novas transações são também estáveis, e a adição de novas transações prossegue iterativamente até que o núcleo seja atingido. Isto é possível graças à transitividade das preferências e ao fato de que a alocação inicial é não-vazia e finita. É fácil então perceber que o núcleo deste jogo conterá um elemento Pareto-eficiente.

### 2.4.1 Ciclos máximos de troca

Uma alocação é dita *factível* se nenhum agente é recompensado com um bem que lhe seja menos preferível do que aquele que lhe fora inicialmente alocado. Ainda, ela é *simples* se existe uma coalizão blocante  $S$  tal que  $x(i) = w_j, \forall i \in S$ , onde  $w_j$  é o bem alocado para o jogador  $i$  na alocação  $x \in X$ . Se  $j \neq i$ , então o jogador  $i$  consegue fazer a troca. Agora, pode-se definir formalmente o *núcleo* como sendo o conjunto de todos os resultados factíveis do jogo.

Se uma alocação simples  $x$  não está no núcleo, então deve haver uma coalizão blocante  $S$  e uma alocação  $y \in X$  tais que  $y$  domina  $x$  via  $S$ , ou seja, nenhum jogador tem recompensa pior em  $y$  do que em  $x$ , sendo  $y$  uma alocação simples. Deste modo, nenhum agente na coalizão blocante  $S$  pode ser parte de uma coalizão blocante de  $y$ . Isto implica que  $S$  é cíclico, onde cada agente obtém o seu bem preferido diante dos agentes que não participam das trocas nas coalizões blocantes de  $x$ . Tal ciclo  $S$  é chamado de *ciclo máximo de troca*. Em outras palavras,  $y(i) = x(i), \forall i \notin S$ .

O conceito de optimalidade de Pareto pode ser aplicado em um algoritmo de ciclo máximo de troca. Diz-se que uma alocação simples  $x$  é Pareto-ótima se não exista alocação simples  $y$  tal que:

- todos os jogadores possuem preferência fraca, isto é, não-estrita, por  $y$  frente a  $x$ ;
- ao menos um jogador prefere estritamente  $y$  a  $x$ .

A garantia de que o núcleo não é vazio vem justamente deste conceito de optimalidade de Pareto. Se for tomada uma alocação Pareto-ótima  $x$ , presume-se que ela esteja no núcleo. Do contrário, deve existir uma alocação simples  $y$  tal que  $y$  tem dominância fraca sobre  $x$  na coalizão de todos os jogadores, o que contraria a optimalidade de  $x$ .

## 2.4.2 Algoritmo de Gale

Considerando este modelo de economia de trocas, Gale e Shapley [23] propuseram um algoritmo de combinações (*matching*) para um jogo com  $n$  agentes, consistindo nos seguintes passos:

1. escolha aleatória de um agente  $j_1$ ;
2. seguir para o agente  $j_2$  cujo bem é preferido por  $j_1$ ;
3. seguir sucessivamente para o agente  $j_i$  cujo bem é preferido por  $j_{i-1}$ ; a finitude de  $n$  culminará na formação de um ciclo;
4. na ocorrência de um ciclo,  $j_1 \rightarrow \dots \rightarrow j_k = j_1, t \leq k$ , efetuar as trocas entre os jogadores  $j_i, t \leq i \leq k$ ; o primeiro ciclo encontrado é justamente o ciclo máximo de trocas;
5. remover estes jogadores do ciclo e repetir o passo 1 com o jogo reduzido;
6. quando todos os agentes forem removidos, é encontrada uma alocação nuclear deste jogo.

Nitidamente, se as preferências forem estritas, a alocação é *única*, pois as mesmas coalizões serão formadas ao final do processo interativo.

## 2.5 Jogos evolucionários

É possível que um jogo possa ter mais de um Equilíbrio de Nash. Portanto, os jogadores agem de modo a convergir para o equilíbrio mais razoável, ou aquele que parecer mais plausível.

No jogo evolucionário, o foco são os *payoffs* gerados pelo encontro de dois ou mais indivíduos. A dinâmica do jogo se desenrola a partir do princípio de que apenas uma certa fração dos jogadores irá adotar a estratégia de equilíbrio. Portanto, dada uma distribuição de estratégias, alguns indivíduos irão eventualmente apresentar

melhores resultados do que outros, fazendo com que sua proporção na população aumente com o decorrer do tempo.

Os jogos são classicamente modelados na forma *normal* ou *estratégica*. Um jogo na forma normal é descrito por uma função que associa um perfil de resultados a cada perfil de decisões, ou seja, uma decisão e seu respectivo resultado para cada um dos agentes envolvidos, sendo que as decisões simultâneas tomadas são aquelas descritas pelo perfil de decisões estabelecido.

No entanto, no caso de jogos evolucionários (dinâmicos), a forma *extensiva* se mostra mais apropriada. Nesta modalidade, o jogo é modelado por uma árvore de decisão, com arestas direcionadas partindo dos nós de decisão dos agentes. Ou seja, cada aresta partindo de um nó representa uma possível decisão a ser tomada pelo agente naquele momento do jogo. A modelagem faz uso da teoria dos grafos para construir tal árvore de jogo, onde o nó inicial corresponde à primeira decisão do jogo enquanto as folhas correspondem ao término do jogo. Nestas folhas está discriminado o *payoff* de cada jogador.

Existe ainda uma estrutura que possui ao mesmo tempo aspectos de uma forma normal e de uma forma extensiva, que é usada para modelar jogos que geram um resultado a cada período, podendo se prolongar *ad eternum*. Para um jogo híbrido, há uma árvore de jogo, com a diferença de que cada nó de decisão corresponde a um jogo completo, com seus resultados, jogado naquele momento. Sendo o jogo dinâmico, os agentes interagem uma vez, jogam e obtêm as consequências de suas decisões, exatamente como na forma normal. Em seguida, os agentes interagem novamente, tomando novas decisões e obtendo os resultados das mesmas. Este processo continua iterativamente até o final do jogo [21].

### 2.5.1 Jogos na forma extensiva

Um jogo no formato extensivo pode ser entendido como a interação sequencial de agentes, que partem de observações ou fatos conhecidos para, então, tomar suas decisões. A representação na forma extensiva de um jogo especifica o conjunto de jogadores, quando cada jogador deve agir, o que cada jogador pode fazer em cada oportunidade de atuação, o que cada jogador conhece em tais oportunidades e o *payoff* recebido para cada combinação de movimentos que poderiam ser escolhidos.

Graficamente, um jogo com estas características é apresentado como uma árvore de decisão, onde cada nó representa uma determinada ação e, por conseguinte, o histórico das interações, pois somente existirá um único caminho pelo qual cada nó em especial pode ser alcançado. A figura 2.4 apresenta um jogo bastante simples, com as prováveis decisões de um agente logo no momento inicial do jogo, representadas pelas estratégias  $s_i$  ao longo das arestas. Cada estratégia  $s_i$  renderá ao agente uma utilidade  $u(s_i)$ . Sendo este jogo de informação completa, o agente tem pleno conhecimento de si mesmo e de qual estratégia é a mais útil, ou seja, qual  $s_i$  lhe trará o melhor resultado.

Este formato básico pode ser estendido para jogos de  $n$ -jogadores, onde as decisões estratégicas são sequenciais e as ações dependem das escolhas alheias, ou do comportamento que se espera que o adversário desenvolva. O modelo se torna mais complexo graficamente, podendo ser corretamente descrito como uma árvore

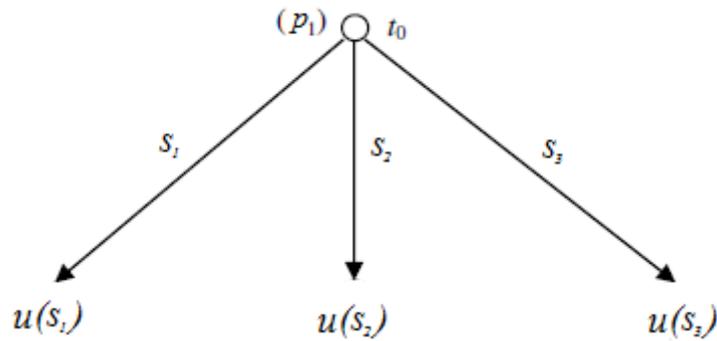


Figura 2.4: Tomada de decisão por um agente em um jogo na forma extensiva.

de decisão. Cada nó na árvore a ser formada tem exatamente uma aresta que chega (todas as ações são de algum modo factíveis) e ao menos uma aresta que sai (em cada momento do jogo, ao menos uma ação será possível). A sofisticação do modelo torna interessante descrever algumas legendas [21]:

1. *nó inicial*: é utilizado um círculo claro para representar o instante  $t_0$  do jogo;
2. *nós de decisão*: os demais nós do jogo são representados por um círculo escuro;
3. *jogadores*: a rotulagem nos nós discrimina os jogadores no jogo; assim, um nó rotulado pelo índice  $i$  é um ponto de tomada de decisão por parte do jogador  $i$ ;
4. *estratégias*: as ações possíveis são representadas pela rotulagem das arestas que ligam os nós de decisão;
5. *recompensas*: os *payoffs* dos jogadores são acessados a partir de um nó terminal, onde uma aresta liga uma decisão às recompensas dos jogadores envolvidos.

## 2.5.2 Protocolo de Rubinstein

Com a finalidade de obter um maior *payoff* para suas ações, os indivíduos dentro de um jogo podem vir a negociar entre si. Para que a negociação tenha sucesso para todos os envolvidos neste processo de barganha, é necessário que os agentes sejam altamente racionais e tenham pleno conhecimento das preferências dos demais indivíduos [24]. Isto sugere um jogo de informação completa, que não é a categoria predominante dos cenários reais.

Surge então o Protocolo de Ofertas Alternadas de Rubinstein. Este protocolo de negociação consiste na barganha entre dois indivíduos, onde cada um lança uma determinada oferta logo após avaliar a oferta realizada pelo oponente na etapa anterior. Sendo assim, são possíveis três ações em cada etapa da iteração:

1. aceitar a oferta do oponente;
2. lançar nova oferta;
3. recusar a oferta e abandonar a negociação.

Assim como na barganha axiomática de Nash, o protocolo de Rubinstein também tem um ponto de equilíbrio. A diferença está no fato de que o protocolo de Rubinstein implementa um fator de normalização chamado de *fator de desconto*, aplicado diretamente à função de *payoff* do agente.

No modelo clássico de Rubinstein, dois jogadores barganham entre si a divisão de certa quantia monetária  $x \in [0, 1]$ , tal que a primeira oferta é  $(x, 1 - x)$ . A distribuição de recompensas é  $(\delta^{1-i}u_1(x), \delta^{1-i}u_2(x))$ , onde  $\delta \in [0, 1]$  é um fator de desconto, atualizado a cada rodada de negociação  $i$ .

Um jogo neste formato pode ser descrito pela forma extensiva conforme a figura 2.5, onde as curvas pontilhadas representam a existência de uma infinidade de escolhas possíveis para  $p_1$  e  $p_2$  respectivamente. Além disso, existe um número infinito de sequências para o jogo a partir da escolha inicial. Cada jogador pode, tempestivamente, optar por aceitar (*acc*) ou recusar (*rej*) a oferta feita por seu oponente.

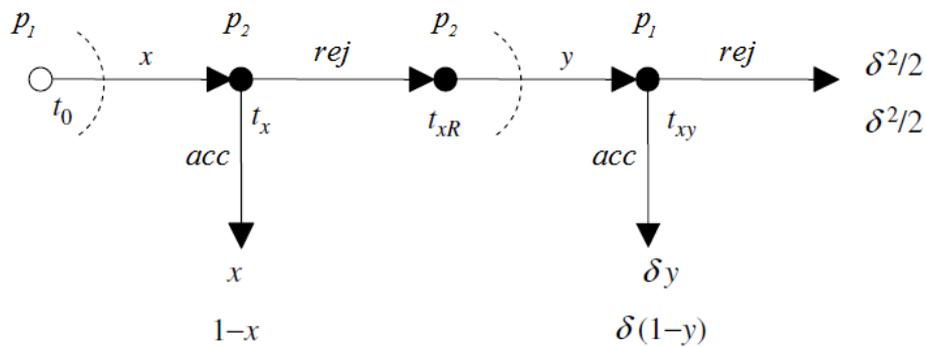


Figura 2.5: Protocolo de Rubinstein para partilha monetária simples.

Eventualmente, os agentes não entrarão em acordo após um certo *deadline*<sup>3</sup>. Na ocorrência desta situação, para que o processo de negociação não seja inteiramente desperdiçado, é aplicada a *arbitragem da oferta final*. Neste ponto, entra em cena o árbitro da negociação, que escolhe uma dentre as diversas ofertas apresentadas pelos jogadores[25].

Este protocolo pode ser modelado da seguinte maneira: supor o conjunto  $X$  composto por todos os pares de utilidade  $(x, y)$  para os jogadores  $u_1$  e  $u_2$ , e as épocas  $t = 0, 1, \dots, n$ . Na época 0, o jogador  $P_1$  propõe a oferta  $(x_0, y_0)$  ao árbitro. Tal oferta é observável por  $P_2$ , que decidirá pela aceitação ou oferecerá ao árbitro uma contra-proposta  $(x_1, y_1)$ . Nesta notação, para bens infinitamente divisíveis,  $x_i \sim (x_i, 1 - x_i)$ , ou seja, quando um jogador apresenta um valor  $x$ , seu oponente recebe a proposta  $y = 1 - x$ .

O jogo acaba assim que alguma oferta for aceita na época  $t = 0, \dots, n - 1$ . Se nenhuma oferta for acatada neste intervalo de tempo, o árbitro tem a responsabilidade de escolher na época  $t = n$  a oferta  $(x_n, y_n) \in \{(x_0, y_0), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})\}$ , conforme seus critérios de justiça na divisão de bens e custos.

Uma possível aplicação do protocolo de Rubinstein com arbitragem da oferta final é justamente a alocação de *slots* de partida para aeronaves em um aeroporto.

<sup>3</sup>Denomina-se *deadline* o prazo para a conclusão de determinada atividade.

Supor que, após  $j$  rodadas de negociação, a última oferta apresentada (e recusada) é  $(x_j, y_j)$ , equivalente à alocação dos *slots*  $s_1$  e  $s_2$  para as aeronaves  $p_1$  e  $p_2$ , respectivamente. Sendo  $s_1$  e  $s_2$  *slots* válidos, o árbitro poderá impor, considerando-se as devidas restrições e probabilidades, a oferta  $(x_{j-1}, y_{j-1})$  ou a oferta  $(x_j, y_j)$ , que são as duas últimas ofertas válidas que expressam a preferência de cada um dos jogadores. Isto equivale a atribuir a  $p_1$  e  $p_2$  os *slots* livres  $s'_1$  e  $s'_2$  mais próximos a  $s_1$  e  $s_2$ , respectivamente.

# Capítulo 3

## Processos decisórios e CDM

Todo processo de tomada de decisão envolve ao menos três passos bem definidos, sendo eles a identificação da situação, o diagnóstico e a escolha da ação. Ao tomar uma decisão, o agente espera contar com certa informação, obtida a partir de seu conhecimento do ambiente. Das informações disponíveis, o agente averigua aquelas que lhe são relevantes e, a partir da combinação das operações de percepção, memória ativa (se for o caso) e racionalidade, o agente pode realizar a verificação dos cenários atual e futuro, podendo assim decidir por adotar o comportamento mais adequado aos seus interesses [4].

Este capítulo expõe a racionalidade por trás dos processos de tomada de decisão. A primeira seção apresenta o conceito de utilidade esperada, que é o norte para a escolha estratégica. Em seguida, são apresentadas as características dos processos estocásticos, modelados sob a propriedade de Markov. O capítulo é encerrado com o estudo do processo de tomada colaborativa de decisão (CDM) e a sua aplicação no contexto aeroportuário, onde recebe o nome de A-CDM (*Airport Collaborative Decision Making*).

### 3.1 Utilidade esperada

Dentro do estudo da Teoria dos Jogos, a mensuração da utilidade de uma decisão é definida por uma função de mesmo nome: a função de utilidade. Quanto maior for o valor de retorno desta função, mais interessante é a escolha por esta ação em especial. Esta utilidade é construída a partir do estudo formal dos parâmetros de influência previamente estabelecidos, que representam o conhecimento que o agente tem a respeito de si mesmo e do ambiente no qual está inserido.

A incerteza na escolha de uma ação geralmente é resultado da falta de conhecimento ou compreensão da situação corrente. De fato, algumas situações dependem de eventos probabilísticos ou estocásticos, que são modelados como ações tomadas por um agente externo chamado *natureza*. Quando o cenário apresenta algum grau de incerteza quanto ao resultado final, o agente deve ter preferências quanto à seleção de suas ações, segundo a associação de probabilidades a estas. Neste contexto, surgem as estratégias mistas e a função de utilidade esperada (UE), formalizada na equação 3.1, onde  $S$  é a estratégia escolhida e  $E$  é a evidência disponível. Um

agente é considerado racional se e somente se ele escolhe a ação que resulta na mais alta utilidade esperada.

$$UE(A|E) = \sum_i P(u_i(S)|S, E)(u_i(S)) \quad (3.1)$$

## 3.2 Processo decisório de Markov

O Processo Decisório de Markov (MDP - *Markov Decision Process*) é caracterizado a partir da Propriedade de Markov, segundo a qual estados anteriores são irrelevantes para a predição dos estados seguintes, desde que o estado atual seja conhecido [4]. De forma geral, um Processo de Markov  $X_n$  é um processo estocástico que, considerado o valor  $X_n$ , os valores  $X_r$  (para  $r > n$ ) não são influenciados pelos valores de  $X_m$ , para  $m < n$ , com  $m, n, r \in N$ . Formalmente, portanto, apresenta-se o enunciado da Propriedade de Markov, dado um conjunto de estados  $S$ , pela equação 3.2.

$$P_r\{X_{n+1} = j \mid X_0 = s_0, X_1 = s_1, \dots, X_{n-1} = s_{n-1}, X_n = s_n\} = P_r\{X_{n+1} = j \mid X_n = s_n\} \quad (3.2)$$

para todo  $n \in N$  e para todos os estados  $s_0, \dots, s_{n-1}, s_n, j \in S$ .

Considerando a satisfação da Propriedade de Markov, o Processo Decisório de Markov se define a partir de [7]:

- um conjunto de estados possíveis;
- um conjunto de ações possíveis;
- uma função de recompensa para cada estado, ou para dupla estado-ação;
- uma descrição do modo como as ações impactam cada estado.

A partir das condições estabelecidas acima, então, parte-se para a busca de um conjunto de ações (política de ações  $\pi$ ) que maximize as recompensas obtidas pelo agente, fazendo com que o mesmo atinja o(s) objetivo(s) para o qual foi concebido. Formalmente, um MDP padrão é definido como se segue:

- Conjunto de estados  $S = \{s_0, \dots, s_n\}$ , contendo ao menos um estado inicial  $s_0$ ;
- Conjunto de ações  $A = \{a_0, \dots, a_k\}$ ;
- Função de recompensa  $R(s, a)$ , definida por  $R : S \times A \rightarrow R$
- Modelo de transição:  $T(s, a, s')$ , definido por  $T : S \times A \rightarrow \pi(S)$ , onde cada elemento do conjunto  $\pi(S)$  representa uma distribuição de probabilidade sobre o conjunto  $S$ .

Com isto em mente, conclui-se que um ambiente não se caracteriza um MDP se o resultado no momento  $t + 1$  para uma ação praticada em  $t$  depende de todo o histórico de ações até o momento atual (a dinâmica do ambiente é definida pela especificação completa da distribuição de probabilidades).

### 3.3 Tomada Colaborativa de Decisão - CDM

A Tomada Colaborativa de Decisão (CDM) é um esforço para dinamizar o gerenciamento de tráfego aéreo através do compartilhamento de informação, adequação de procedimentos, desenvolvimento de ferramentas de suporte e equalização da percepção do cenário entre todas as entidades envolvidas [26].

A observância do CDM permite que a tomada de decisão seja feita de maneira colaborativa, uma vez que cada agente tenha pleno conhecimento de si mesmo e das demais entidades, sabendo quais são as capacidades, limitações, preferências e restrições das mesmas [27]. Para tanto, é imprescindível que toda a informação pertinente seja compartilhada entre os agentes, e que esta seja completa, precisa e atualizada.

A tomada colaborativa de decisão pode ser também aplicada especificamente ao escopo aeroportuário, onde recebe a denominação de A-CDM (*Airport Collaborative Decision Making*). Aqui, a metodologia é utilizada para aprimorar o gerenciamento de capacidade e de fluxo de tráfego a nível de aeroporto, com o objetivo de reduzir atrasos e aumentar a previsibilidade de eventos, o que conseqüentemente culmina na otimização da utilização dos recursos [28].

O sucesso do A-CDM somente é obtido quando a informação relevante é tempestivamente compartilhada entre todos os parceiros. Estes dados devem possuir suficiente qualidade, para serem efetivamente considerados para a tomada de decisão dos agentes. As devidas decisões devem ser tomadas por quem de direito e devem ser globalmente conhecidas, o que torna intrínseco ao modelo o senso de responsabilidade.

A tomada de decisão por parte dos agentes somente é considerada eficiente se os mesmos possuírem plena consciência da situação corrente do cenário. No que tange o cenário aeroportuário, o A-CDM é dividido em seis elementos. São eles:

- Compartilhamento de informação: atuação conjunta entre os monitores da utilização dos recursos de solo, torre de controle, órgãos ATC e companhias aéreas;
- Utilização de marcos de controle (*milestones*): observação de eventos significativos na operação da aeronave, como momento do *taxi-in*, início do embarque, fechamento das portas etc;
- Tempo variável de taxiamento: gerenciamento da aeronave desde o momento da aterrissagem até a completa parada, ou do trajeto desde a posição de embarque até a cabeceira da pista;
- Sequenciamento prévio de decolagens: elaboração de uma fila primária de decolagens na ordem FIFO (*first in, first out*), tendo como base os planos de voo dos indivíduos interessados;
- Identificação de condições adversas: condições meteorológicas impactantes (neblina, neve, chuva);
- Gerenciamento colaborativo de informações atualizadas dos voos ativos: conhecer e saber utilizar os dados disponíveis.

No contexto do A-CDM, o TOBT (*Target Off-Block Time*), ou o horário previsto de *off-block*<sup>1</sup>, é o horário estimado pela companhia aérea para que o embarque esteja completo, portas fechadas, ponte de embarque removida e trator de *push-back* esteja a postos, apenas faltando a autorização para partida. A consequência imediata da atribuição correta do TOBT é o aumento da previsibilidade do TTOT (*Target Take-off Time*), ou seja, do momento exato em que a aeronave decola. Isto impacta direta e positivamente o gerenciamento da capacidade de setores ATC e a aplicação de medidas restritivas a aeronaves em rota [27].

### 3.3.1 Os quatro níveis do A-CDM

Todo o espectro operacional do CDM no contexto aeroportuário é dividido em quatro níveis de aplicação, desde a implementação mais básica, focada no compartilhamento básico de informações, até a implementação mais sofisticada, onde a consciência do cenário (*situation awareness*) é estendida a parceiros de outros aeródromos. Cada nível de aplicação agrega ao cenário um benefício incremental. Naturalmente, o último nível somente é possível com a completa maturidade do processo como um todo [29].

Os quatro níveis da aplicação do A-CDM são definidos da seguinte forma:

#### Nível básico

O nível primordial do CDM tem como objetivo o estabelecimento de uma consciência global do cenário aeroportuário. Isto aumenta a previsibilidade da malha aérea, o que torna mais eficiente o planejamento sistêmico nos níveis pré-tático e tático. As principais tarefas executadas pelos parceiros envolvidos são justamente o compartilhamento de informações e a monitoração dos marcos de controle.

#### Segundo nível

O segundo nível tem seu foco no aumento da pontualidade das operações por meio da incorporação de certa flexibilidade ao cenário. Esta flexibilidade é possível através da atualização constante dos dados, detectados na monitoração do tráfego aéreo e da utilização dos recursos do aeródromo. O envolvimento dos órgãos de controle de fluxo é essencial nesta etapa, sendo que a troca de mensagens entre o aeródromo e os órgãos de controle de fluxo é feita de maneira bidirecional: enquanto a torre tem a responsabilidade de enviar ao órgão ATC as informações de intenção de partidas, este órgão é responsável por prover os horários estimados de aterrissagem das aeronaves em rota.

Ressalta-se também a importância do cálculo do tempo de taxiamento da aeronave, o que efetivamente reflete a eficiência da utilização dos recursos de solo. Este cálculo deve ser realista, tomando em conta a utilização das pistas, o tipo da aeronave, o congestionamento de tráfego etc. O resultado é relevante para a avaliação do progresso da aeronave, o que permite o cálculo acurado do ETOT (*Estimate Take-Off Time*).

---

<sup>1</sup>*Off-block* é o momento em que uma aeronave inicia sua movimentação a fim de decolar.

Como consequência, as operações aeroportuárias se tornam mais flexíveis. Sendo conhecidas as preferências dos operadores das aeronaves e as restrições aeroportuárias, é possível manejar os *slots* de decolagem conforme conveniência, ou seja, é elaborada uma fila de decolagens com base no princípio colaborativo dos agentes envolvidos.

### **Terceiro nível**

O terceiro nível do CDM prossegue com o objetivo de aumentar a flexibilidade operacional do aeródromo através da otimização da utilização dos recursos. Neste momento, é importante que seja estabelecido um mecanismo de recuperação de situações adversas. A eventual diminuição da capacidade aeroportuária deve ser gerenciada de maneira colaborativa, uma vez que a fila colaborativa de decolagens torna flexível a distribuição de *slots* com base nas preferências dos parceiros.

A aplicação de CDM em condições adversas conta com o gerenciamento colaborativo de capacidade quando a mesma estiver reduzida. A principal tarefa desempenhada nesta etapa é a avaliação preditiva das inconformidades, com o subsequente acionamento dos programas de recuperação. Esta aplicação define estratégias sistemáticas de recuperação, a fim de que as condições normais de operação sejam restabelecidas mais rapidamente. Aqui se observa a nítida vantagem da aplicação do A-CDM com relação aos procedimentos *ad hoc*, colocados em prática somente após a ocorrência dos eventos impactantes.

### **Nível avançado**

O quarto nível das aplicações CDM é uma evolução dos procedimentos CDM adotados nos passos anteriores. Tecnologias de transmissão de dados e monitoração via radar ou satélite, como por exemplo GPS, devem ser largamente utilizadas nos mecanismos de comunicação e acompanhamento. De fato, estas tecnologias são cruciais para o A-CDM avançado, uma vez que todos os parceiros interessados devem possuir total conhecimento do cenário a nível global e receber atualizações em tempo real. Órgãos de controle, operadores de linhas aéreas e outros aeroportos passam a compor este grupo de parceiros. Aqui, o processo está no auge do amadurecimento e toda a tecnologia já está implantada.

A divisão do CDM dentro destes quatro níveis de aplicação é feita de modo a facilitar a implantação gradual desta metodologia, permitindo que os usuários constantemente avaliem o seu nível de maturidade no processo de tomada colaborativa de decisão.

### **3.3.2 Impactos do A-CDM nos parceiros envolvidos**

A tomada colaborativa de decisão nos aeroportos conta com o trabalho conjunto dos parceiros envolvidos. De algum modo, esta colaboração sempre existiu. No entanto, até a formalização da metodologia, esta colaboração se concentra em serviços *ad hoc*, falhando nas questões do planejamento e gerenciamento do tráfego aéreo [29].

No contexto colaborativo, são chamadas de parceiros todas as entidades interessadas no desempenho do A-CDM. Portanto, cada parceiro deseja ter atendidas

as suas expectativas, e cada um tem suas responsabilidades no cenário. É possível discriminar os parceiros em três categorias distintas: órgãos de gerenciamento e controle de fluxo (ATC), entidades negociais (companhias aéreas) e gerenciamento aeroportuário (TWR e controle de solo).

## Órgãos ATC

A nível de controle, os órgãos ATC procuram resolver os problemas de congestionamento e sobrecarga da malha aérea. As operações pré-táticas são drasticamente afetadas pela falta ou ineficiência de informação, o que inviabiliza a acurácia da alocação de *slots* de partida. O sequenciamento inadequado das partidas culmina na introdução de atrasos desnecessários e na imprevisibilidade da carga da malha aérea, o que acaba por onerar ainda mais os órgãos de gerenciamento de fluxo, uma vez que a aplicação de medidas restritivas se torna eventualmente necessária [29].

O grande benefício do A-CDM para os órgãos de controle é a obtenção do horário de *off-block* (CTOT - *Calculated Off-Block Time*) mais acurado, sendo então possível gerenciar de maneira mais adequada a capacidade aeroportuária. Ainda, o planejamento das decolagens se torna mais flexível e os congestionamentos em rota são minimizados.

A responsabilidade dos órgãos de controle e gerenciamento de fluxo no âmbito colaborativo é essencialmente a disponibilização de informações inerentes ao cenário de tráfego, como a provisão de dados meteorológicos e dados a respeito das aeronaves em operação. Como sugestão, seria interessante ainda o cálculo e a divulgação de previsões a respeito de cenários futuros a curto prazo, conforme trabalho de previsão de cenários documentado em detalhes por Ribeiro *et al* [2].

## Companhias aéreas

O grande impacto dos atrasos na malha aérea incide diretamente sobre a operação das companhias aéreas, que são os principais responsáveis pelos movimentos nos aeroportos e no espaço aéreo. Enquanto os órgãos ATC têm seu foco na segurança da operação, as companhias são afetadas no que tange à viabilidade de seu negócio, o que se traduz em impacto financeiro. Problemas com a pontualidade têm como consequências a má utilização da frota, o desperdício de combustível e o evidente descontentamento dos clientes (passageiros), que enfrentam o desconforto natural dos atrasos e, por vezes, perdem seus voos de conexão.

A estratégia de *Turn-round Milestones*, ou seja, monitoração dos marcos de controle da aeronave enquanto a mesma se prepara para o próximo voo durante seu período de estacionamento (*in-block*), é essencial para o sucesso do A-CDM [27]. Isto diminui os atrasos introduzidos por restrição da torre de controle ou pelas próprias atividades de manutenção pré-voos, aumenta o poder de previsão de eventuais descompassos na agenda programada do voo e minimiza o consumo de combustível e os tempos de táxi e de espera em solo [30].

## Torre de controle

As operações da torre de controle têm impacto imediato em todos os agentes envolvidos no cenário aeroportuário. É da TWR a responsabilidade do ajuste da sequência de partida das aeronaves e a monitoração da utilização dos recursos do aeródromo. A primeira consequência da incompletude da informação conhecida pela torre é a imprevisibilidade do tempo de *turn-around*<sup>2</sup> das aeronaves, o que torna inviável a atribuição dos CTOTs e, portanto, a alocação eficiente dos *slots* de partida. Deste modo, a infraestrutura aeroportuária é utilizada de maneira ineficiente, uma vez que os recursos são sub-utilizados ou sobrecarregados.

O A-CDM, quando aplicado, aumenta a pontualidade das operações de solo e otimiza a utilização dos recursos e das pistas de táxi, decolagem e aterrissagem do aeródromo. Naturalmente, a consequência disto é que as decolagens são autorizadas com menores atrasos. Ainda, eventos relacionados a condições adversas podem ser mitigados e os impactos ambientais são minimizados, considerando-se a economia de combustível por parte das aeronaves.

---

<sup>2</sup>*Turn-around* é o tempo em que a aeronave onera a logística do aeroporto.

# Capítulo 4

## Conceitos e considerações em ATFM

Antes que este trabalho seja efetivamente iniciado, é fundamental o esclarecimento de alguns conceitos e definições básicas a respeito do tráfego aéreo. Este Capítulo se encarrega exatamente desta tarefa, com a apresentação dos principais serviços de tráfego aéreo na seção 4.1. Também é feita a distinção entre os conceitos de ATM (*Air Traffic Management*) e ATFM (*Air Traffic Flow Management*), nas seções 4.2 e 4.3.

Na seção 4.4, o processo de movimentação de uma aeronave é descrito detalhadamente, desde a decolagem até a aterrissagem. O escopo de atuação da implementação alvo deste trabalho é exatamente a fase que precede a decolagem da aeronave e, por esta razão, são expostas algumas restrições inerentes a esta fase de operação na seção 4.5.

Para que uma aeronave possa iniciar seu voo, é necessário apresentar um documento chamado de *plano de voo* (FPL), que é apresentado na seção 4.6, e na seção 4.7 é exposto o panorama do funcionamento dos serviços de tráfego aéreo no Brasil. O Capítulo é encerrado com a seção 4.8, que descreve sucintamente a infraestrutura aeroportuária no país.

### 4.1 Conceitos gerais

Apenas algumas décadas atrás, a utilização do espaço aéreo não impunha a mesma complexidade da atualidade, pois as aeronaves eram sobremodo lentas e os voos eram realizados apenas durante o dia. O piloto da aeronave não possuía os recursos instrumentais providos atualmente e os voos operavam segundo as regras de voo visual (*Visual Flight Rules - VFR flights*) ou seja, a navegação era baseada simplesmente na visão do piloto. Neste período, o espaço aéreo não apresentava problemas como congestionamentos ou probabilidades significativas de colisão, pois o volume de aeronaves no cenário era inexpressivo [31].

Com o aumento da complexidade da malha aérea global, foi imperativo desenvolver novas tecnologias para a manutenção adequada do tráfego aéreo, com vistas a diminuir o número de incidentes e a contornar a falibilidade humana, potencialmente fatal nesta modalidade de transporte. Isto levou ao estabelecimento de

diversas regras para a execução de voos com auxílio instrumental por parte de órgãos de controle, que são a maioria dos voos operados atualmente. Os voos que operam com auxílio de instrumentos de navegação são chamados de *IFR flights* (*Instrumented Flight Rules*) [32].

#### **4.1.1 Serviços de tráfego aéreo - ATS**

Os Serviços de Tráfego Aéreo (ATS - *Air Traffic Services*) têm a finalidade de proporcionar o relacionamento entre o operador de um órgão de tráfego aéreo e o piloto da aeronave [33]. Estes serviços são prestados em todo o espaço aéreo do território nacional, incluindo águas territoriais e jurisdicionais, bem como o espaço aéreo que se superpõe ao alto mar que tiver sido objeto de acordos internacionais. Para se realizar esta tarefa, o ATS deve prover recursos de comunicação e tecnologia, que permitam que os objetivos sejam entendidos e atendidos, como manter a distância mínima entre aeronaves, divulgar informações de voo, de alerta e serviços de resgate, entre outros.

Serviços de tráfego aéreo incluem várias modalidades de prestação de serviços que auxiliam a navegação das aeronaves [32]. São classificados em:

1. Serviços de Informação de voo;
2. Serviços de Alerta;
3. Serviços de Auxílio Instrumental à Navegação;
4. Serviços de Controle de Tráfego Aéreo:
  - Controle de Área (Setor);
  - Controle de Aproximação;
  - Controle de Aeródromo.

O órgão ATS tem a competência de tomar ações gerenciais para a garantia da qualidade do serviço. Tais ações visam formalizar os protocolos de operação e elaborar procedimentos para análise e correção de falhas, sejam estas humanas, técnicas ou até mesmo inerentes aos formalismos procedimentais existentes [33].

## **4.2 Gerenciamento de Tráfego Aéreo**

O Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM) tem por objetivo permitir que as aeronaves cumpram seus horários previstos de partida e chegada, a partir de planos de voo bem definidos, tendo garantidas todas as exigências operacionais de segurança [34]. Esta tarefa é desempenhada através da manutenção de um fluxo ótimo do tráfego aéreo, condicionado à capacidade do controle de tráfego aéreo (ATC - *Air Traffic Control*) e às limitações impostas pelas autoridades provedoras dos serviços de tráfego aéreo [32]. A capacidade ATC pode ser definida como a quantidade de movimentos aéreos simultâneos que um setor de controle de tráfego aéreo comporta [4].

Os órgãos de controle de tráfego aéreo devem operar com extrema precisão operacional, ou seja, com o menor volume possível de informações empíricas, pois neles está confiada a tarefa de prevenção de incidentes no tráfego aéreo [33]. Tal controle é dividido entre o controle terrestre e o controle aéreo.

A tarefa principal do ATM é estabelecer estruturas, procedimentos e regras de utilização do espaço aéreo, com base na demanda de tráfego aéreo atual e futura, bem como na topologia e infraestrutura instalada [7]. Para tal, o ATM é responsável por definir:

- as necessidades operacionais que irão balizar as diversas concepções de empreendimentos para a implantação de órgãos de controle de tráfego aéreo, equipamentos-radar, auxílios à navegação aérea, equipamentos de telecomunicação, ferramentas computacionais de apoio, bem como o dimensionamento de pessoal operacional, entre outros;
- as estruturas para o uso eficaz do espaço aéreo - aerovias, procedimentos de subida e descida, delimitação de áreas controladas, não controladas e condicionadas etc;
- as ações adequadas para cada segmento do espaço aéreo;
- os espaços onde os controladores de tráfego poderão prover a separação das aeronaves.

### 4.3 Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo

O Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) é um dos serviços de tráfego aéreo (ATS), provido com vistas a controlar a fluência da malha aérea nas regiões para as quais tal serviço é prestado. Espera-se a garantia da execução de um voo de acordo com o plano de voo previsto, cumpridos os seus exatos horários de decolagem e aterrissagem. De fato, a fase crítica do voo se dá quando a aeronave chega a uma área terminal [31].

Esta situação introduz algumas complicações no transporte aéreo, pois é imperativo garantir que um voo decole e pouse com segurança em seu destino, com o menor atraso possível. Para que este objetivo seja satisfatoriamente alcançado, algumas *medidas restritivas* devem ser adotadas eventualmente, como, por exemplo, a já mencionada espera em solo, a diminuição de velocidade por parte da aeronave e, em casos mais extremos, a espera em ar (AHP - *Airborne Holding Problem*) ou desvios de rotas. Estas situações frequentemente causam desconfortáveis e caros atrasos, mas são criadas a fim de que o número de congestionamentos seja reduzido e a segurança no voo seja garantida. O problema AHP também é comum em casos onde a aeronave se aproxima de um aeródromo em situação de congestionamento, estando esta impedida de aterrissar até que receba autorização da torre de controle.

Uma das dificuldades na aplicação de medidas restritivas está em distribuir de maneira justa (de acordo com critérios preestabelecidos para ajustes de prioridade de aeronaves) tais restrições de movimentação entre os usuários da malha aérea.

Para tal, mecanismos computacionais são desenvolvidos para dar suporte ao trabalho dos prestadores de serviço e, conseqüentemente, ao deslocamento seguro e com o menor custo dos usuários (entenda-se por *custo* o impacto causado por atrasos e por deslocamentos não anteriormente considerados nos planos de voo). De fato, os atrasos em voos apresentam um alto custo financeiro em termos de consumo de combustível [30]. Portanto, qualquer alteração no traslado previsto de uma aeronave vem acompanhada de um custo financeiro associado, bem como o custo de imagem para a companhia aérea frente aos seus clientes.

O serviço ATFM tem como principal objetivo a busca de um fluxo ótimo de tráfego aéreo onde a demanda de tráfego supera a capacidade da infraestrutura instalada destinada ao controle de tráfego aéreo. Esta tentativa da correta aplicação de medidas restritivas é, portanto, papel do *Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo* [34].

Esta tarefa é executada em três fases de planejamento, que antecedem a realização do voo:

- Planejamento estratégico: é a fase de coordenação das atividades relacionadas ao balanceamento entre a demanda e a capacidade, com o planejamento das ações a serem tomadas em eventuais casos de congestionamento. Inicia-se até seis meses antes do voo e encerra-se na antevéspera. Este planejamento é desenvolvido pelo Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea brasileiro (CGNA) junto aos CINDACTAs [7];
- Planejamento pré-tático: é iniciado na véspera e se encerra até duas horas antes da ocorrência do voo, compreendendo as ações da projeção de demanda junto aos órgãos de controle. São consideradas as alterações na infraestrutura aeronáutica e aeroportuária e verificação das condições meteorológicas para a execução segura do voo;
- Planejamento tático: se inicia duas horas antes da execução do voo e é encerrado somente na aterrissagem. As atividades compreendem as medidas de regulação a serem aplicadas em conjunto com o ATC [1], contando com o monitoramento da utilização do espaço aéreo para a verificação da ocorrência de eventos não previstos.

## 4.4 As fases do voo IFR

Cada voo parte de uma origem e se utiliza de uma via de navegação para chegar ao seu destino. A estas vias dá-se o nome de *aerovias*, que são tratadas exatamente como estradas no espaço aéreo. Os pontos de origem e destino são chamados de *aeródromos*, que são as áreas destinadas a pouso, decolagem e movimentação de aeronaves. Os aeroportos são aeródromos públicos dotados de instalações e facilidades para apoio às operações de aeronaves e de embarque e desembarque de passageiros e cargas<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Conceitos extraídos do Código Brasileiro de Aeronáutica (Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986)

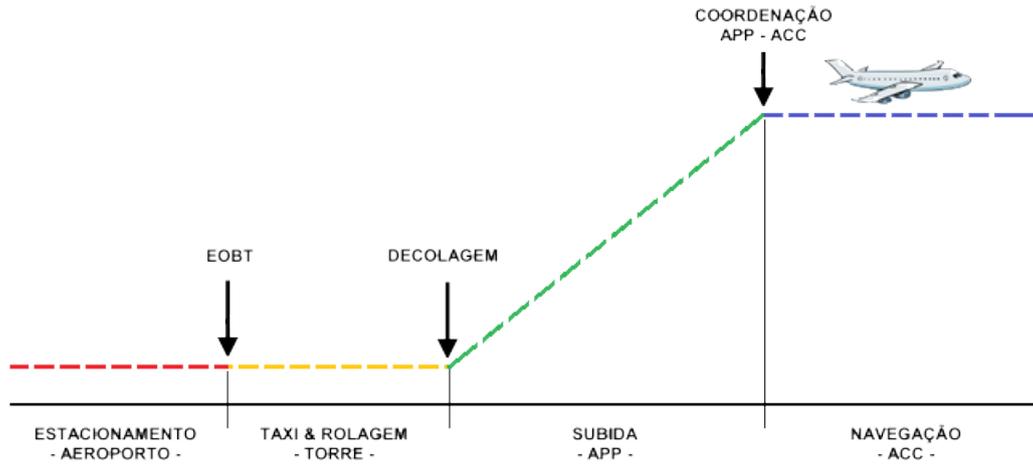


Figura 4.1: Estágios do processo de decolagem de uma aeronave.

Desde o planejamento do voo até à aterrissagem da aeronave, um voo IFR passa por diversas fases de operação [30]. Estas fases compreendem desde o planejamento do voo até o fim de sua execução. Nesta seção serão sucintamente apresentadas estas fases e os órgãos de controle responsáveis por cada uma delas [2], a fim de que sejam compreendidos os procedimentos efetuados durante o deslocamento da aeronave entre dois aeródromos e como os mesmos interferem no cenário de tráfego aéreo.

- Fase pré-voo: compreende as fases de planejamento pré-tático e planejamento tático. Nesta fase está o foco deste trabalho.
- Taxiamento (*taxi out*): a aeronave é autorizada a realizar o *push-back*, que consiste no posicionamento da aeronave na pista de rolagem, e então acionar os motores. O piloto conduz a aeronave até a cabeceira da pista, onde deve aguardar pela permissão para decolar.
- Decolagem (*take off*): a torre de controle do aeródromo autoriza a decolagem da aeronave. Ao atingir a altitude de 35 pés<sup>2</sup>, ou seja, quando não estiver mais em solo, a aeronave deixa o controle da torre (TWR) e passa para o controle de aproximação (APP), que será então responsável por guiar a aeronave durante o procedimento de subida dentro do setor terminal (TMA).
- Ascendência (*climbing*): a aeronave continua o processo de subida rumo à altitude de cruzeiro prevista no plano de voo. Ao atingir a altitude especificada em carta de rota (em média 15000 pés), a aeronave sai da TMA e entra na aerovia pretendida.
- Cruzeiro (*cruise*): a aeronave ajusta sua altitude e velocidade, passando a ser responsabilidade do centro de controle de área (ACC).
- Descida inicial (*descent*): a aeronave reduz gradativamente sua altitude até atingir a TMA. Caso a terminal esteja congestionada, é aplicada uma medida

<sup>2</sup>Um pé (ft) equivale a 0,3048 m; portanto, um metro equivale a 3,28 ft.

restritiva sobre a aeronave para atrasar a sua entrada na TMA. As aeronaves sob esta condição entram em uma fila lógica, geralmente voando em círculos e provocando o indesejado problema de espera em rota (AHP), o que aumenta consideravelmente o custo financeiro do traslado [35].

- Aproximação final (*approach and landing*): quando chega à terminal destino, o controle volta a ser do APP. A partir deste ponto, a aeronave diminui o gradiente de descida a fim de chegar na pista de pouso com a velocidade adequada para tal. Para a aterrissagem, a aeronave conta com a aprovação da torre de controle.
- Taxiamento (*taxi in*): após tocar a pista em segurança, a aeronave diminui gradativamente a velocidade e é manobrada rumo ao portão de desembarque. A equipe de controle de solo é responsável por conduzir a aeronave pelo pátio sem que isto interfira nos demais pousos e decolagens, até a parada completa da aeronave e desativação dos motores.

## 4.5 Restrições operacionais

Ao observar as fases de voo apresentadas na seção 4.4, é fácil separar a movimentação da aeronave em três principais estados:

- aeronave em solo/decolagem;
- aeronave em voo;
- aeronave em aterrissagem.

### 4.5.1 Controle de saturação

Com relação às operações de controle de pousos e decolagens em aeroportos, dois níveis primários de controle são impostos: torre de controle e controle de aproximação (APP). Os voos em procedimento de decolagem são transferidos do nível de torre de controle para o nível de controle de aproximação, e os voos que estão chegando ao aeroporto são transferidos de maneira inversa, do controle de aproximação para a torre de controle.

Os controladores de torre são responsáveis por todo o gerenciamento do tráfego no aeroporto. Esta tarefa é bastante complexa, sendo então dividida em três frentes de controle: alocação (sequenciamento), taxiamento e controle de pista [36].

Esta operação de chegada e saída de aeronaves à terminal sofre com restrições operacionais, tanto com relação à capacidade de gerenciamento do APP quanto com relação à capacidade de controle de armazenamento aeroportuário. Deste modo, a torre de controle não pode despachar mais voos do que comporta o APP, nem o aeroporto pode receber mais aeronaves do que a capacidade aeroportuária instalada. Quando isto acontece, o APP coloca as aeronaves em espera ou, eventualmente, redireciona os voos para outros aeroportos.

A prioridade neste procedimento sempre é das operações de aterrissagem, fazendo com que as decolagens sejam apropriadamente encaixadas nos intervalos

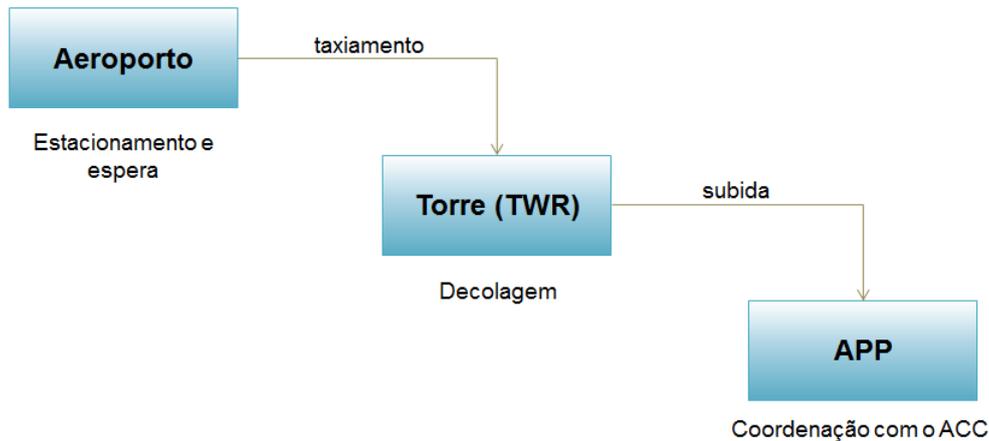


Figura 4.2: Estágios de Partida com seus respectivos níveis operacionais.

entre os pousos. Isto é explicado pelo fato de que o estado de espera no ar (AHP) é sempre mais caro do que o estado de espera em solo (GHP - *Ground Holding Problem*). No entanto, quando a taxa de aterrissagens é muito elevada, o aeroporto atinge um estado de saturação, pois as decolagens são feitas menos frequentemente do que as aterrissagens. Nesta situação, é necessário interromper os procedimentos de aterrissagem de modo a possibilitar as decolagens e, assim, normalizar a configuração do cenário.

Para as aeronaves em cruzeiro, isto é, em pleno voo, as medidas restritivas se resumem em alteração da velocidade, nível de voo ou alteração de rota. Cada uma destas aeronaves ocupa um segmento entre dois *fixos* na rota, que são pontos de notificação pelos quais devem passar. Por sua vez, tais segmentos se localizam dentro de divisões lógicas do espaço aéreo, denominadas *setores de controle*. Uma aeronave entra na primeira vez em um setor de controle durante o voo assim que sai do controle de terminal (TMA) e, por sua vez, deixa seu último setor também ao entrar em uma TMA.

O problema existente enquanto a aeronave está em rota é simplesmente a condição de congestionamento do setor de controle. A situação de congestionamento é encontrada assim que a ocupação do setor chega a 80% de sua capacidade, e a condição de saturação ocorre quando o setor opera em sua capacidade máxima. Em nenhuma hipótese a ocupação de um setor pode ultrapassar sua capacidade, pois é eminente o risco à segurança do tráfego aéreo. Então, para se evitar tais condições, a decisão mais sensata é a retenção das aeronaves em solo até que a transferência de controle de terminal para o controle de área (ACC) não apresente mais riscos à navegação.

## 4.5.2 Procedimentos pré-decolagem

As tarefas para gerenciamento de pista visam o agendamento eficiente das decolagens, sendo imprescindível a elaboração de um plano de decolagem para cada aeronave. Este plano de decolagem é composto essencialmente pelo planejamento de *gate* (atribuição de posição operacional em solo e início e duração do embarque

de passageiros ou carga)<sup>3</sup>, pelo plano de taxiamento para o deslocamento da aeronave até a pista de rolagem e pelo plano de *runway*<sup>4</sup>, que efetivamente conduz a aeronave até a cabeceira da pista, de onde a mesma deixa o solo [36].

Destas três tarefas de planejamento, destaca-se o plano de *runway*, do qual é possível derivar o planejamento de *gate* e o planejamento de taxiamento. Aqui, é feita a especificação de qual pista de rolagem cada aeronave utilizará para decolar, e em que momento. Um dos elementos a se considerar nesta especificação é a esteira de turbulência gerada por aeronaves em operações anteriores de pouso ou decolagem.

O processo de rolagem da aeronave no trajeto compreendido entre a plataforma de embarque/carregamento e a pista de decolagem é chamado de táxi. Em termos técnicos, o táxi é definido como o movimento autopropulsado de uma aeronave sobre a superfície de um aeródromo, excetuando-se os instantes de decolagem ou aterrissagem [37]. Portanto, a aeronave está em processo de taxiamento enquanto a mesma se desloca pelo solo entre partes distintas do aeródromo.

O processo de taxiamento tanto ocorre após a aterrissagem quanto antes da decolagem, sendo chamado de *taxi-in* no primeiro instante e de *taxi-out* no segundo. Como o escopo deste trabalho é a partida das aeronaves, trata-se aqui apenas do procedimento de *taxi-out*. Antes de decolar, a aeronave precisa solicitar a autorização antes mesmo do acionamento dos motores. Neste ponto, é definido o meta do tempo de partida (TTD - *Target Time for Departure*), que é o horário desejado da decolagem, e a meta do tempo de *off-block* (TOBT - *Target Off-block Time*), que é o horário desejado para o *push-back* da aeronave, ou seja, o momento em que a mesma abandona sua posição de embarque e inicia a movimentação em solo.

O controle de *Ground* (solo) é responsável pelo tráfego da aeronave neste ínterim, sendo sua tarefa evitar que:

- aeronaves utilizem simultaneamente a mesma rota, em sentidos e direções distintas;
- uma aeronave se desloque com velocidade superior a outra que esteja à sua frente na mesma rota e mesmo sentido de deslocamento;
- duas aeronaves trafeguem simultaneamente em sentidos opostos na mesma rota, uma direção à outra.

Estas características da movimentação em solo trazem à tona a questão da capacidade aeroportuária, que geralmente é o gargalo nas situações de saturação e congestionamento. Observa-se que a infraestrutura destinada à ocupação das aeronaves em solo é fundamental para a eficiência das operações de pousos e decolagens, uma vez que a taxa de liberação das aeronaves para decolagem (*throughput*) muitas vezes esbarra na limitação da quantidade de aeronaves que podem estar em atividade nas pistas do aeródromo.

---

<sup>3</sup>A meta de início da operação da aeronave no aeródromo é chamada de TSAT (*Target Start-Up Approval Time*)

<sup>4</sup>Termo técnico para designar a pista de rolagem.

## Tempo de taxiamento

Os tempos de taxiamento são essenciais para os seguintes cálculos:

- horário estimado de ingresso na posição de estacionamento (EIBT - *Estimated In-Block Time*);
- horário estimado de decolagem (ETOT - *Estimated Take-Off Time*), considerando o horário esperado de *off-block* e o tempo previsto de taxiamento até a cabeceira da pista (EXOT - *Estimated Taxi-out Time*);
- meta de horário de decolagem (TTOT - *Target Take-Off Time*), considerando o tempo a ser transcorrido entre o horário de aprovação inicial e o EXOT;
- tempo de decolagem calculado (CTOT - *Calculated Take-Off Time*), resultado da alocação tática de *slots*, que reflete o tempo em que se espera que a aeronave já esteja no ar.

Em aeroportos mais complexos, é comum a grande diferença entre os tempos de táxi entre as aeronaves. Portanto, o tempo necessário para o taxiamento deve ser calculado de maneira individualizada para cada aeronave [28]. Naturalmente, este cálculo depende das características locais do aeródromo.

O horário estimado de *taxi-in* (EXIT - *Estimated Taxi-in Time*), agregado ao horário real de aterrissagem, é fundamental para o cálculo do EIBT, o que favorece a coordenação das operações de *gate* e, portanto, contribui para o processo colaborativo em solo. O mesmo vale para as decolagens, onde o horário estimado de *taxi-out* (EXOT), agregado ao horário estimado de *off-block* (EOBT - *Estimated Off-block Time*), é fundamental para o cálculo do horário estimado de decolagem (ETOT). Deste modo, o órgão ATC pode atualizar o perfil de voo da aeronave em questão e trabalhar de maneira mais eficiente no gerenciamento da capacidade da malha.

No processo decisório colaborativo, o tempo de taxiamento é tratado como segue:

- Para voos chegando ao terminal: o tempo real de *taxi-in* (AXIT) é o período entre o horário real de aterrissagem (ALDT) e o horário real de parada total da aeronave (AIBT);
- Para voos saindo do terminal: o tempo real de *taxi-out* (AXOT) é o período entre o horário real de início da movimentação (AOBT) e o horário real de decolagem (ATOT);

Os parceiros que lidam diretamente com a movimentação das aeronaves (ATC e operadores de solo e *gates*) são as mais precisas fontes de informação. Conforme eventos são observados, os parâmetros operacionais tratados no período de taxiamento podem ser alterados, o que requer monitoramento e eventual regularização da situação do tráfego, influenciando diretamente o horário de autorização de *push-back*. Quanto mais completa a monitoração, mais realistas serão os valores calculados para o EXIT e o EXOT. Alguns parâmetros que podem afetar o tempo de taxiamento são a infraestrutura aeroportuária, as pistas em uso, condições meteorológicas, tipo e peso da aeronave, densidade de tráfego, procedimentos operacionais locais, dentre outros.

## **Cálculo do período de taxiamento**

Em aeroportos menores, é perfeitamente possível utilizar um período de taxiamento padrão. No caso de aeroportos maiores, a configuração das pistas de rolagem pode impactar o tempo de táxi de maneiras distintas para as aeronaves. Então, faz-se efetivamente necessário o cálculo dos EXIT e EXOT.

Os principais parâmetros que devem ser utilizados neste cálculo são:

- os tempos padronizados de taxiamento;
- dados provenientes dos órgãos de controle relativos à movimentação das aeronaves na TMA;
- tipo ou categoria da aeronave;
- histórico de taxiamento;
- tempos de taxiamento específicos para as condições operacionais correntes;
- rotas para taxiamento.

De fato, na maioria dos aeroportos é utilizado um tempo de referência padronizado para o taxiamento, que é, em média, igual a cinco minutos, no caso de uma pista de aterrissagem, e igual a nove minutos, no caso de uma pista de decolagem, podendo variar conforme a configuração do aeródromo [28]. Não há distinção de categoria de aeronave nestas características<sup>5</sup>. No entanto, esta medida pode ser aperfeiçoada ao serem considerados dados históricos de taxiamento para cada configuração de pista. É feita a média de utilização da pista de acordo com períodos específicos do ano, dias da semana, períodos do dia etc. Obviamente, a velocidade de deslocamento da aeronave também é um parâmetro essencial para este cálculo.

### **4.5.3 Separação entre as aeronaves**

A distância entre as aeronaves, tanto em voo quanto em solo, é um fator crítico de segurança, pois esta distância deve garantir que as manobras feitas pelas aeronaves não ponham em risco a si próprias, bem como seus tripulantes, nem a terceiros, como edifícios ou outras aeronaves. Obviamente, a segurança é o aspecto mais importante a ser considerado, contudo não sendo o único. Deve-se levar também em consideração aspectos como o aproveitamento máximo do espaço disponível, esteira de turbulência, situações de emergência, estado do sistema de radares, fase do voo entre outros. Todos estes fatores em conjunto definem os valores que devem ser adotados para a distância mínima entre as aeronaves.

Os fatores para aplicação da separação apropriada entre aeronaves são relativos a dois momentos críticos de um voo, que são:

- durante o sequenciamento de aproximação;
- nas saídas e chegadas aos aeródromos controlados;

---

<sup>5</sup>No contexto do taxiamento, as aeronaves são classificadas de acordo com a esteira de turbulência que geram ao se movimentar.

As distâncias mínimas adotadas visam sempre agilizar o fluxo de tráfego e garantir a segurança. Existem alguns conceitos técnicos importantes para a completa compreensão que devem ser ressaltados:

- **Separação Radar:** separação utilizada quando a informação de posição da aeronave é obtida utilizando um sistema de radar;
- **Sequenciamento de Pouso:** ordem na qual as aeronaves são posicionadas para o pouso;
- **Sequenciamento de Aproximação:** ordem na qual duas ou mais aeronaves são posicionadas na aproximação para o aeródromo dentro de uma TMA, CTR ou próximo a estas.

### **Esteira de turbulência**

Quando a aeronave se movimenta e o ar atinge suas asas, são gerados vórtices circulares pelo ar em deslocamento. Isto ocorre devido à diferença de pressão na extensão da superfície das asas. A menor pressão é exercida na superfície superior, enquanto que a maior pressão é exercida na superfície inferior. O ar se desloca da parte de baixo em direção à ponta da asa, e vira para cima em direção à superfície superior da asa.

Um vórtice assume um movimento circular em torno de uma região central, onde o ar pode atingir a velocidade de até 100 m/s em aeronaves maiores. Este vórtice pode ser de grandes dimensões, chegando a atingir 30 metros de diâmetro, persistindo em atividade por um tempo médio de três minutos [38]. O rastro de vórtices que a aeronave deixa para trás é chamado de esteira de turbulência.

A esteira de turbulência provocada pelas aeronaves de médio e grande porte sempre foi um assunto conhecido da maioria dos aviadores. Os vórtices gerados nas pontas das asas se intensificam com o aumento do arrasto induzido da aeronave. Devem ser considerados os mínimos de separação em relação à esteira de turbulência, previstos em função da categoria das aeronaves, quando for aplicada a Separação Radar. Aplica-se o valor de separação mínima que for maior.

A esteira de turbulência tem maior ou menor intensidade, exercendo sobre outra aeronave um efeito que varia conforme o tipo da aeronave, fase do voo ou condições meteorológicas. Durante a decolagem ou aterrissagem, o efeito da esteira é especialmente importante, pois a proximidade com o solo dificulta a recuperação de incidentes relacionados à influência de turbulências. Ainda, quanto menor a envergadura da aeronave, mais suscetível ela estará aos efeitos provocados pela esteira de turbulência.

A figura 4.3 apresenta graficamente como são originados os vórtices pelas asas da aeronave [38]. Na parte (a), observa-se o sentido de rotação dos vórtices na ponta das asas, Na parte (b), os vórtices se afastam lateralmente com relação ao vetor deslocamento da aeronave. Por fim, a parte (c) especifica as dimensões que as esteiras geradas podem assumir.

É fundamental a observação de três fatores para a atribuição de uma distância mínima entre aeronaves:

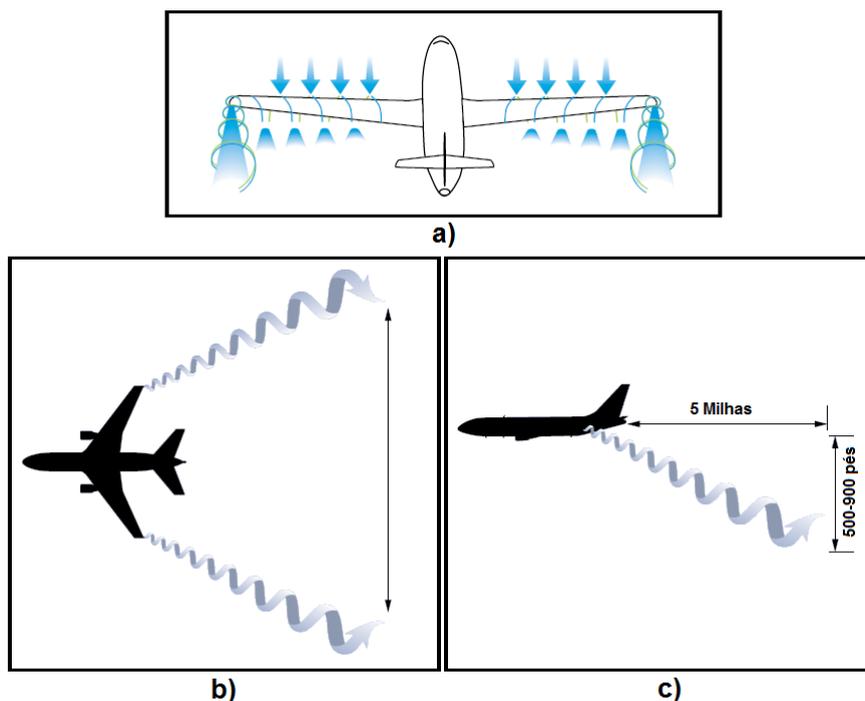


Figura 4.3: Vórtices de turbulência em uma aeronave.

- peso da aeronave;
- velocidade;
- configuração.

### Categorias de peso

Levando em consideração todos estes fatores, as aeronaves são classificadas de acordo com categorias específicas. Para cada categoria, uma distância mínima é especificada com o intuito de se manter uma separação de acordo com as esteiras de turbulência geradas. As aeronaves são divididas nas seguintes categorias, de acordo com o MCTOW (*Maximum Certificated Takeoff Weight*), ou seja, o peso máximo de decolagem<sup>6</sup>:

- leve: MCTOW de até 7000 kg. São geralmente jatos de pequeno porte;
- médio: MCTOW superior a 7000 kg e inferior a 136000 kg. Nesta categoria se enquadra grande parte das aeronaves comerciais para transporte de passageiros, como o A320 e o B737;
- pesado: MCTOW superior a 136000 kg. Aeronaves como o A340, B747 (e superiores) e MD11 são consideradas aeronaves de grande porte.

<sup>6</sup>Esta classificação é utilizada para a definição das separações mínimas nas simulações do CoDMAN, conforme porte da aeronave (vide seção 6.3).

## Separação radar

As distâncias mínimas de separação radar, estabelecidas em função das características técnicas e operacionais do equipamento radar e da estrutura do espaço aéreo, normalmente não são inferiores a 5NM (cinco milhas náuticas). Em TMA ou CTR, poderá ser utilizada uma separação radar mínima com valor compreendido entre 3NM e 5NM se atendidas as seguintes condições [38]:

- as aeronaves envolvidas estejam a menos de 40 NM da antena radar;
- as informações de posição da aeronave sejam oriundas de fonte de radar primário;
- as informações radar sejam de uma única antena, não devendo ser utilizadas com sistema múltiplos radares;
- os controladores de tráfego aéreo e os pilotos estejam familiarizados com este procedimento.

Nos casos genéricos de um voo de cruzeiro sob controle de radar, é aplicada a separação quando uma aeronave trafega diretamente atrás de outra ou intersecta sua rota, no mesmo nível de voo (em um raio de meia milha náutica ou até 1000 pés abaixo). Os valores para a separação mínima recomendada são fornecidos pela tabela 4.1.

Tabela 4.1: Separação Radar aplicada a aeronaves em cruzeiro

Aeronave à frente	Aeronave em sequência ou cruzando atrás	Separação mínima
pesada	pesada	4NM
	média	5NM
	leve	6NM
média	leve	5NM

A informação de separação mínima recomendada com relação ao tempo de diferença entre as operações é encontrada na tabela 4.2. Nela, são informadas as separações mínimas recomendadas para aeronaves em decolagem ou aterrissagem utilizando a mesma pista (ou uma pista próxima paralela), ou se seus trajetos se intersectam no mesmo nível de voo (ou com uma diferença de 1000 pés).

## 4.6 Plano de voo

Para cada aeronave que parte de um aeródromo e entra em um espaço aéreo para o qual são prestados serviços ATS (*Air Traffic Services*), existem parâmetros proce-

Tabela 4.2: Separação utilizada para aeronaves em processo de aterrissagem ou decolagem na mesma trajetória de voo

Aeronave à frente	Aeronave em sequência ou cruzando atrás	Tempo mínimo de separação
pesada	pesada	2 min
	média	2 min
	leve	3 min
média	leve	3 min

dimentais estabelecidos pelo Comando da Aeronáutica que estabelecem uma documentação descritiva da intenção de execução de voo por parte desta aeronave. Esta documentação é utilizada para indicar toda a informação referente à movimentação pretendida da aeronave, objetivando obter uma aprovação de *Slot* ATC, ou seja, a alocação do recurso de controle para o tráfego aéreo <sup>7</sup>.

#### 4.6.1 Modalidades de planos de voo

Conforme regulamento específico do CGNA, o Plano de Voo é o documento onde são detalhadas informações relacionadas ao voo planejado de uma aeronave ou com parte do mesmo que são fornecidas aos órgãos prestadores de serviços de tráfego aéreo [39]. As diferentes modalidades de planos de voo são apresentadas em documentos específicos do Instituto de Proteção ao Voo:

- Plano de Voo Completo, apresentado através do documento IEPV 100-20;
- Notificação de Voo (Plano de Voo Simplificado), via documento IEPV 100-7;
- Plano de Voo Repetitivo (RPL), via documento IEPV 100-21.

Existe ainda um documento chamado AFIL (*Flight Plan Filed in the Air*), apresentado pelo piloto sempre que sua aeronave decole de um aeródromo desprovido de órgão do serviço de tráfego aéreo. Como o próprio nome diz, o documento é preenchido durante o voo, e deve ser apresentado até o momento em que haja certeza de que o órgão ATS adequado possa recebê-lo, pelo menos, dez minutos antes da hora em que a aeronave estime chegar ao ponto previsto de entrada em uma CTA (*Control Transfer Area*) ou em uma área de assessoramento de tráfego aéreo. Os itens que devem ser fornecidos ao órgão ATS no caso do AFIL são quase idênticos aos previstos para o formulário IEPV 100-20 [39].

<sup>7</sup>O conceito de *slot* é discutido com mais detalhes na seção 5.1.

## 4.6.2 Facultabilidade na apresentação do plano de voo

A apresentação do plano de voo é, na maioria dos casos, obrigatória. Como não há sempre esta obrigação, é conveniente elucidar as condições onde a entrega dos planos de voo é facultativa.

O plano de voo sempre é obrigatório nas situações [40]:

- antes da realização de um voo IFR;
- antes da partida de aeródromo provido de órgão ATS;
- após a partida de localidade desprovida de órgão ATS, se a aeronave dispuser de equipamento capaz de estabelecer comunicação com órgão ATS;
- quando há pretensão de voo através de fronteiras internacionais.

No entanto, a apresentação do plano de voo é dispensada em certos casos, usualmente envolvendo aeronaves de pequeno porte e aeroportos não gerenciados pelo CGNA. Não precisam apresentar o plano de voo:

- aeronaves que efetuem voo em missão de resgate e salvamento (SAR - *Search and Rescue*);
- aeronaves que trafegam sob condição VFR (*Visual Flight Rules*), cuja decolagem seja realizada de aeródromo desprovido de órgão ATS, até que haja possibilidade de estabelecer comunicação com um órgão ATS para apresentação do AFIL;
- aeronaves sob condição VFR que não disponham de equipamento de rádio, desde que a decolagem seja realizada de aeródromo desprovido de órgão ATS e a aeronave não cruze fronteiras internacionais.

## 4.6.3 Formulário de Plano de Voo Repetitivo (RPL)

O plano de voo relativo a voos regulares é chamado de Plano de Voo Repetitivo (RPL - *Repeated Flight Plan*). Tais voos operam com base em Horário de Transporte, realizados frequentemente e com idênticas características básicas, apresentado pelo explorador para retenção e uso repetitivo pelos órgãos ATS. Os RPL somente serão utilizados para voos regulares que se realizem ao menos uma vez por semana, perfazendo um total mínimo de dez voos e quando houver previsão para uma utilização mínima de dois meses. Somente aos voos IFR aplicam-se os RPL. O principal requisito de utilização é que os dados dos RPL tenham um alto grau de estabilidade, de modo que as mudanças que porventura ocorram possam ser facilmente executadas. Os RPL são característicos das aeronaves de voo comercial, mas não limitados a apenas estas.

O RPL deve ser apresentado à Central de Planos de Voo Repetitivos (CPVR) pelos seguintes mecanismos [40]:

- formulário eletrônico, utilizando a Internet;
- por meio de remessa via FAX;

- pessoalmente, por meio de formulário impresso (IEPV 100-21).

Deverão ser apresentadas pela parte interessada à CPVR as correspondentes propostas de plano de voo, com antecedência mínima de dez dias do início do período de vigência [39]. Os planos de voo serão então processados pela CPVR, que distribuirá as correspondentes listagens eletrônicas, ou impressas, aos Centros de Controle de Área envolvidos, e posteriormente emitir um relatório de erros para as empresas usuárias do sistema. As propostas de RPL, após processadas e aceitas pela CPVR, serão incluídas em um cadastro, que é atualizado três vezes ao mês (a cada dez dias), para remessa aos órgãos envolvidos.

LOC: SBBR INÍCIO DE VALIDADE: 09jul2011 PAG.: 2							
VALIDO DESDE	VALIDO ATE	DIAS STQSSD	OP ANV	IDENT	TIPO TURB	ADEP EOBT	VEL FL
200211	UFN	1234500		GLO1622	B738/M	SBBR0950	N0440 370
=====							
ROTA	DEST		OBSERVACOES				
		EET					
-----							
UW11		SBCF0110 EQPT/WRG PBN/D101					

Figura 4.4: Exemplo de Plano de Voo Repetitivo.

A figura 4.4 apresenta um exemplo de Plano de Voo Repetitivo<sup>8</sup>. Este RPL pertence ao voo 1662 da companhia aérea GOL, válido para execução a partir do dia 20 de fevereiro de 2011, com validade indeterminada. Os números 1234500 indicam que o voo é executado de segunda-feira a sexta-feira. Além da rota a ser seguida e de outras observações inerentes ao voo, *e.g.* equipamentos de segurança a bordo, estão descritos:

- aeródromo de origem: SBBR (Brasília - DF);
- aeródromo de destino: SBCF (Belo Horizonte - MG);
- horário de partida: 09h50m;
- duração prevista de voo: 01h10m;
- modelo da aeronave: Boeing 738;
- velocidade média de cruzeiro: 440 nós<sup>9</sup>;
- nível de voo: FL 370 (37000 pés).

## 4.7 O tráfego aéreo no Brasil

Nesta seção, é apresentado um panorama do tráfego aéreo no Brasil. É levantado um breve resumo histórico e é feita a apresentação das organizações responsáveis

<sup>8</sup>Fonte: CGNA [41].

<sup>9</sup>Nó é uma unidade de medida de velocidade equivalente a uma milha náutica por hora.

pela sadia manutenção da navegação aérea no país, juntamente com a descrição da configuração do espaço aéreo brasileiro. É mostrado também um sumário da movimentação de passageiros nos principais aeroportos do país e as expectativas no aumento da demanda para os próximos anos.

#### **4.7.1 Histórico**

No ano de 1990, foi instituído o Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), conduzido pelo Comando da Aeronáutica através de seu órgão central, o DECEA (Departamento de Controle do Tráfego Aéreo), visando integrar o Sistema de Proteção ao voo (SPV), Sistema de Telecomunicações do Ministério da Aeronáutica (STMA), Sistema de Busca e Salvamento (SISSAR) e Sistema de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (SISDACTA). Os CINDACTAs são elos do SISDACTA que têm a responsabilidade de assegurar a confiabilidade e segurança do fluxo do tráfego aéreo nas áreas sob sua jurisdição [1], que são o território continental brasileiro e a parte ocidental do Oceano Atlântico.

#### **4.7.2 Órgãos competentes**

A distribuição de deveres e responsabilidades entre as entidades que gerenciam o espaço aéreo brasileiro são muito bem definidas e distribuídas, tendo caráter legal [42].

##### *1. Departamento de Controle do Espaço Aéreo - DECEA*

O DECEA é o órgão subordinado ao Ministério da Defesa e ao Comando da Aeronáutica que tem a atribuição de coordenar os serviços de navegação aérea e o Controle do Espaço Aéreo Brasileiro, garantindo assim a segurança do transporte aéreo e a soberania do país [43]. A missão deste órgão é planejar, implantar, integrar, normatizar, coordenar e fiscalizar as atividades de controle do espaço aéreo brasileiro, de telecomunicações aeronáuticas e de informática. Para tal, o DECEA conta com um complexo sistema de controle do espaço aéreo, distribuído como segue:

- quatro Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA)
- um Serviço Regional de Proteção ao Voo (SRPV)
- cinco Centros de Controle de Área (ACC - *Area Control Center*)
- 46 Controles de Aproximação (APP)
- 60 Torres de Controle de Aeródromo (TWR - *Tower*)
- 79 Destacamentos de Controle do Espaço Aéreo (DTCEA)
- Estações de Telecomunicações Aeronáuticas, em número superior a 90.

##### *2. Serviço Regional de Proteção ao Voo / CINDACTA*

Informar ao CGNA (ver adiante) os eventos sazonais que possam alterar a demanda de tráfego aéreo que venham a comprometer a circulação aérea geral.



Figura 4.5: Aeroportos coordenados no Brasil. Fonte: CGNA.

### 3. *Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea*

O CGNA conta com todas as Células de Gerenciamento de Fluxo (FMC - *Flux Management Cells*), usuários, ANAC e Infraero para dirigir a operação do sistema de gerenciamento do tráfego. Para isso, utiliza-se de informações meteorológicas e informações sobre inoperâncias no sistema de gerenciamento de tráfego. As principais responsabilidades do CGNA são a implementação de programas nacionais de ATFM, alocação e monitoração do uso dos *slots* ATC para os aeroportos coordenados e a realização de projeções e de balanceamento entre demanda e capacidade, tanto em aeroportos quanto em setores ATC.

### 4. *Órgãos de Controle de Tráfego Aéreo*

Fornecer ao CGNA ou às FMC dados técnicos e/ou operacionais referentes às respectivas áreas de jurisdição, quando solicitados. As FMC são responsáveis pelo apoio ao Órgão ATC, abastecendo-o, com antecedência de 12 horas, com as informações da análise de demanda, operacionalidade dos órgãos ATS, dos meios técnicos da infraestrutura aeronáutica e/ou aeroportuária e dos fenômenos meteorológicos que afetam a navegação aérea em sua área de jurisdição. Elas coordenam inclusive as aplicações das medidas táticas de gerenciamento de fluxo.

### 5. *Órgãos de Meteorologia*

Fornecer ao CGNA ou às FMC dados de previsão e/ou de observação dos fenômenos meteorológicos referentes às respectivas áreas de jurisdição, quando solicitados.

### 6. *Salas de Serviço de Informações Aeronáuticas*

Ao receber um Plano de Voo (PLN) envolvendo um aeroporto coordenado, verificar a existência do código referente ao slot ATC alocado. Caso não exista o código, o procedimento previsto para *slot* ATC de oportunidade deverá ser seguido.

### 4.7.3 Regiões de Informação de Voo

Uma FIR, ou Região de Informação de Voo, é dimensionada da seguinte maneira [34]:

- limite vertical superior: ilimitado;
- limite vertical inferior: solo ou água;
- limites laterais: indicados nas ERC;

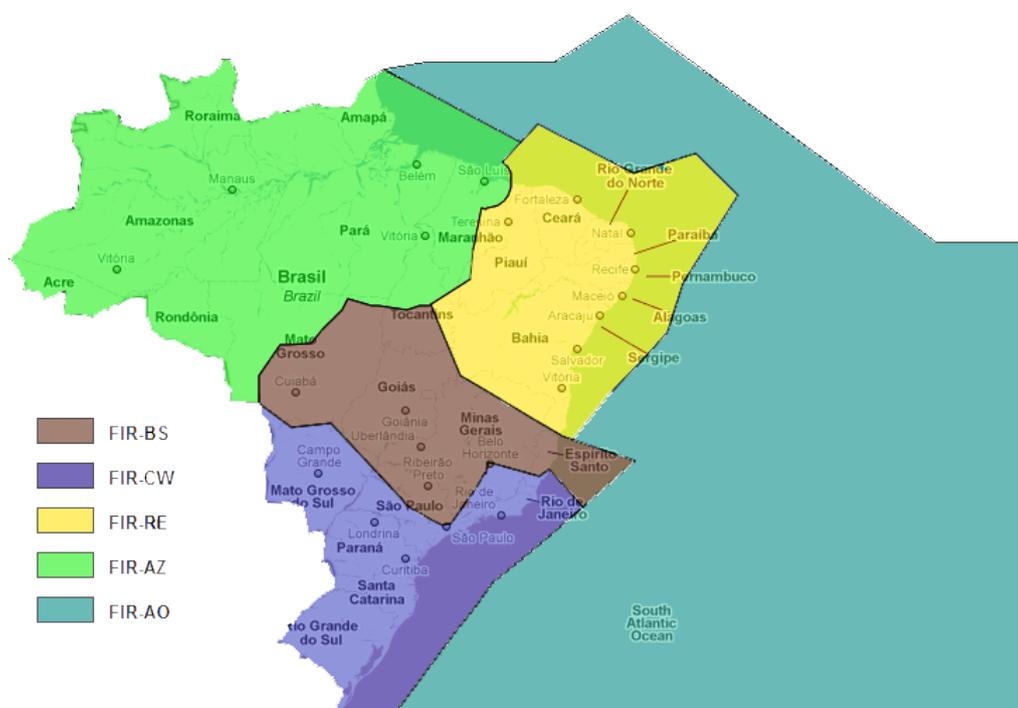


Figura 4.6: Regiões de Informação de Voo no Brasil

A jurisdição do espaço aéreo brasileiro é distribuída por quatro CINDACTAs. Este espaço é dividido em cinco FIRs, somando um total de 22 milhões de  $km^2$  [44]. A figura 4.6 ilustra as FIRs do Brasil:

- FIR Brasília (FIR-BS), de responsabilidade do CINDACTA I, compreendendo a região Centroeste, a parte ocidental de Minas Gerais, o norte de São Paulo e a costa do estado do Espírito Santo. Esta FIR comporta cerca de 45% do tráfego aéreo do Brasil [43];
- FIR Curitiba (FIR-CW), de responsabilidade do CINDACTA II, compreendendo a região Sul, o estado do Rio de Janeiro, partes de São Paulo e Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e a costa sul brasileira;

- FIR Recife (FIR-RE), de responsabilidade do CINDACTA III, compreendendo a região Nordeste e sua costa. O CINDACTA III também é responsável pela FIR Atlântico (FIR-AO), que é a área oceânica entre Brasil, África e Europa. Praticamente todos os voos provenientes da América do Sul com estes destinos cruzam o espaço aéreo sob a tutela do órgão.
- FIR Amazônia (FIR-AM), de responsabilidade do CINDACTA IV (Manaus), compreendendo a região amazônica e parte dos estados de Mato Grosso e Maranhão.

## 4.8 Infraestrutura aeroportuária no Brasil

Um estudo elaborado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) concluiu que 14 dos 20 maiores terminais de passageiros do Brasil operaram acima de sua capacidade em 2010 [45]. De fato, com o aumento na quantidade de movimentos de aeronaves no cenário aéreo, surge a necessidade de ampliação da capacidade aeroportuária, uma vez que os terminais devem suportar toda a carga de pousos e decolagens impostas ao cenário.

Tabela 4.3: Movimento de aviões e de passageiros nos aeroportos brasileiros (em milhões de unidades)

Ano	Aviões	Passageiros
2003	1,77	71,22
2004	1,79	82,71
2005	1,84	96,08
2006	1,92	102,19
2007	2,04	110,57
2008	2,13	113,26
2009	2,29	128,14
2010	2,65	155,36
2011	2,89	179,95
2012 (até o mês de setembro)	2,14	144,26
Variação 2003-2011 (%)	63,27%	152,67%
Variação média anual (%)	6,4%	12,44%

A tabela 4.3 fornece um panorama das movimentações de passageiros e aeronaves nestes aeroportos, onde é possível constatar que, apenas no ano de 2010, o

Tabela 4.4: Aumento nas capacidades dos aeroportos brasileiros (em milhões de passageiros por ano)

Aeroporto	Capacidade		
	2010	2014	Variação (%)
Manaus	2,5	5,0	100,0%
Fortaleza	3,0	6,0	100,0%
Brasília	10,0	18,0	80,0%
Guarulhos	20,5	35,0	70,7%
Salvador	10,5	10,5	0,0%
Campinas	3,5	11,0	214,3%
Cuiabá	1,6	2,8	75,0%
Confins	5,0	8,5	70,0%
Porto Alegre	4,0	8,0	100,0%
Curitiba	6,0	8,0	33,3%
Galeão	18,0	26,0	44,4%
Natal	1,9	1,9	0,0%
Recife	8,0	8,0	0,0%
Total	94,5	148,7	57,4%

volume efetivo de passageiros extrapolou em 5,62 milhões a capacidade aeroportuária no país. Verifica-se que a capacidade instalada dos aeroportos brasileiros não acompanhou o forte crescimento da demanda nos últimos anos.

Apenas no período compreendido entre os anos de 2003 e 2011, a movimentação de passageiros nos aeroportos brasileiros aumentou em cerca de 153%, segundo o mesmo levantamento divulgado pelo IPEA. Visando a Copa de 2014, que será realizada no Brasil, o Governo Federal abriu processos de licitação para concessões à iniciativa privada, bem como assegurou à Infraero a disponibilidade de recursos para investir R\$ 5,6 bilhões em 13 aeroportos de 2011 a 2014. Isto representa R\$ 1,4 bilhão ao ano, um valor consideravelmente superior à média investida entre 2003 e 2010 (R\$ 430,3 milhões) [46].

A tabela 4.4 compara o crescimento planejado da capacidade destes 13 aeroportos, conforme investimentos para a Copa de 2014<sup>10</sup>.

Quando a expectativa de demanda de tráfego aéreo em um determinado aeroporto é superior à sua capacidade, este passa a ser considerado um *aeroporto coor-*

<sup>10</sup>Fonte: Infraero.

*denado*. Isto significa que todas as operações de pouso e decolagem por parte dos vôos regulares de passageiros, transporte de carga ou da rede postal são condicionadas à obtenção de *slot* ATC. A figura 4.5 apresenta todos os aeroportos coordenados atualmente no Brasil.

Um dos pontos de gargalo no gerenciamento de tráfego aéreo surge justamente do fato de que as aeronaves devem sofrer medidas restritivas para que os congestionamentos nos terminais sejam evitados. Como é mais caro e menos seguro aplicar tais medidas a aeronaves no ar, a medida restritiva padrão é a retenção da aeronave em solo.

Naturalmente, os investimentos em infraestrutura são fundamentais para uma operação sadia dos terminais de passageiros. Não obstante, um gerenciamento eficiente das partidas de aeronaves no terminal deve ser implementado.

# Capítulo 5

## Estado da arte em procedimentos de alocação

Neste Capítulo, são apresentadas quatro técnicas para o tratamento do problema específico do gerenciamento de decolagens. A seção 5.1 aborda o problema da alocação de *slots* com a priorização do ponto de vista das companhias aéreas. A seção 5.2 descreve os experimentos de tomada colaborativa de decisão feitos pelo EUROCONTROL em aeroportos selecionados da União Europeia.

Na seção 5.3, é apresentado um modelo que se utiliza das abordagens *Ration by Schedule* (RBS) e *Compression* para a garantia da Equidade em ATFM no sequenciamento de decolagens. A seção 5.4 estuda a utilização da Teoria dos Jogos para o balanceamento da demanda das companhias aéreas por *slots* em aeroportos e para o balanceamento de fluxos em rotas, nas etapas de planejamento estratégico e tático, respectivamente. Por fim, na seção 5.5 é feita uma apreciação das deficiências encontradas nas abordagens propostas.

### 5.1 Slot Allocation

Um *slot* ATC (*Air Traffic Control*) é definido como um intervalo de tempo estabelecido para que uma aeronave realize uma operação de pouso ou decolagem. Zografos *et al.* [47] identificaram que a alocação de *slots* nos aeroportos da União Europeia (UE) esbarra na deficiência dos mecanismos de suporte à decisão disponíveis para os controladores de *slots*, tendo como resultado a falha na combinação adequada entre *slots* solicitados e *slots* efetivamente alocados para as companhias aéreas.

Obviamente, a capacidade do aeroporto é fator crucial na eficiência da alocação. No entanto, estudos demonstraram que o fator demanda *versus* capacidade não é isolado, mas também ocorre uma má utilização dos *slots* disponíveis, uma vez que *slots* não utilizados devido a atrasos impactam significativamente a redistribuição na alocação.

Foi então proposto um modelo de otimização dos procedimentos de alocação de *slots* da UE/IATA<sup>1</sup>, onde o objetivo é acomodar melhor os *slots* de acordo com as preferências das companhias aéreas. Isto é possível a partir da minimização da

---

<sup>1</sup>*International Air Transport Association*

diferença entre os tempos de *slot* solicitados e alocados. Um modelo de programação linear inteira é implementado para a desejada alocação ótima em uma classe específica de prioridade, onde é calculado o custo de alocação de *slot* para uma manobra (pouso ou decolagem) tendo como base a restrição de capacidade de um dado aeroporto em um determinado dia  $d$ .

O modelo é descrito por meio de quatro funções, que são:

1. minimização da diferença absoluta entre o *slot* solicitado e o agendado;
2. garantia de alocação de cada manobra em um *slot*;
3. sujeição das manobras às restrições de capacidade;
4. aplicação das restrições de tempo de *turnaround* a manobras já alocadas, considerando os intervalos de segurança entre as manobras de pouso e decolagem.

A solução é aplicada de maneira hierárquica para cada classe de prioridade, de modo que é necessária uma atualização das restrições de capacidade após cada alocação para uma classe de prioridade específica.

No projeto em questão, apoiado pelo Secretariado Grego de Pesquisa e Tecnologia, foi considerado na simulação o período de agendamento do verão de 2009 com dados dos aeroportos gregos de Heraklion, Rhodes e Chania, servindo-se de *slots* de intervalo de 5 minutos. Em comparação com a situação real, a eficiência do modelo proposto aumentou em pelo menos 14% a alocação inicial dos *slots*, sendo obtida a otimização de 65% ao se elevar a capacidade aeroportuária em 20%. Foi verificado também que a solução do problema é substancialmente mais complexa para as classes de prioridade mais baixas, considerando o ambiente mais restrito devido à baixa disponibilidade de *slots* para alocação. Tais classes de prioridade apresentam uma maior diferença entre os *slots* solicitados e os efetivamente alocados.

### **5.1.1 Modelo baseado em restrições (*constraints*)**

Como evidenciado no experimento anterior, uma modesta elevação da capacidade aeroportuária pode impactar de maneira significativa o desempenho operacional do modelo. No entanto, van Leeuwen *et al* [36] não consideraram esta possibilidade em seu trabalho. Ao invés disso, a equipe de pesquisa desenvolveu um mecanismo baseado na satisfação de restrições que, uma vez identificadas, eram adicionadas ao modelo e então utilizadas na busca por uma sequência ótima de decolagens.

As autoridades de aviação civil em todo o mundo empreendem constantes esforços para que a capacidade aeroportuária seja aumentada, sem que a segurança do transporte aéreo seja prejudicada. No entanto, na maioria dos casos, expandir a capacidade aeroportuária não é a opção mais viável, pois é um processo caro, lento e que causa severo impacto ambiental. Tendo isto em mente, van Leeuwen *et al* propuseram este modelo de auxílio aos controladores de torre em sua tarefa de estabelecer uma sequência ótima de decolagens, dadas as pistas disponíveis para tal. Deste modo, o modelo de sequenciamento proposto consiste na alocação das pistas

e roteiros de decolagem (SID), bem como na aplicação dos procedimentos específicos do aeroporto para a liberação das aeronaves para a subida inicial e os limites de desempenho da aeronave em particular. O problema da satisfação de restrições passa a ser, portanto, uma técnica para planejamento e alocação de pistas para decolagem.

Na simulação, foi utilizada a ferramenta ILOG Solver, da IBM, para o agendamento das decolagens. A tarefa de agendamento consiste conceitualmente na alocação de recursos escassos a determinadas atividades, por um dado período de tempo. O aeroporto utilizado nesta simulação foi o Ruzyne, em Praga, República Tcheca.

Para cada voo agendado  $F_i$  corresponde o seguinte conjunto de variáveis: as características específicas da aeronave, o ponto de destino e o intervalo de tempo no qual a aeronave precisa decolar. No caso desta implementação, o ponto de destino é o ponto de saída da TMA, no qual a aeronave deixa de fazer parte do processamento. Como resultado preliminar, espera-se obter, para cada  $F_i$ :

- um horário de saída (*slot*),
- a melhor rota de decolagem (pista e SID),
- tempo total esperado de voo.

Para que o problema seja resolvido a partir da premissa da satisfação de restrições, é necessário também construir um conjunto de variáveis  $X = [x_1, \dots, x_n]$ , um conjunto  $D_i$  de valores possíveis para cada  $x_i$  (domínio) e um conjunto de restrições sobre os valores que podem ser simultaneamente assinalados para cada variável. Este conjunto de restrições é uma tabela armazenada internamente pelo *framework* utilizado, e consiste basicamente de restrições de ordenação das atividades desempenhadas, horário dos *slots*, separação entre as aeronaves e topologia do aeródromo.

Um ponto interessante neste mecanismo é que o resultado de um evento passa a fazer parte do conjunto de restrições dos eventos posteriores. Esta propagação de restrições é a razão pela qual os potenciais conflitos evitam que seja feito *backtracking* desnecessário nos cálculos, diminuindo-se a complexidade computacional do modelo. Como resultado das simulações, foi possível elaborar o sequenciamento de 12 aeronaves em até 0,46 segundos. Em uma nova simulação, são adicionadas três aeronaves chegando ao aeroporto, o que deteriorou o processamento para até 6,3 segundos.

## 5.2 Procedimentos em A-CDM

A tomada colaborativa de decisão (CDM - *Collaborative Decision Making*) é um esforço que tem o objetivo de incrementar o processo decisório no gerenciamento de tráfego aéreo através da troca de informações em tempo real por parte das aeronaves [26]. A técnica é estudada pelos centros de controle mais importantes do mundo, como a FAA (Estados Unidos) e o EUROCONTROL (União Europeia), sob o nome de A-CDM (*Airport CDM*).

O foco inicial do CDM era o tratamento do problema da espera em solo (GHP), com protótipos implantados pela FAA nos aeroportos de San Francisco e Newark, nos Estados Unidos. As companhias aéreas participantes eram responsáveis por enviar suas agendas operacionais ao centro de controle de tráfego aéreo. Através deste monitoramento ininterrupto das agendas das aeronaves, foi possível monitorar a demanda nos aeroportos e, assim, implementar programas mais eficientes de espera em solo.

O pilar principal do CDM é a interação entre os agentes, que, neste contexto, são as aeronaves, os órgãos de controle e as próprias companhias aéreas. A abordagem colaborativa nesta modelagem é embasada na alocação justa de *slots*, onde dois algoritmos principais são frequentemente utilizados para fornecer o adequado suporte à decisão, sendo eles<sup>2</sup>:

- RBS, na tentativa de garantir o menor número de alterações na sequência inicial de partidas;
- *Compression*, no aproveitamento de *slots* desalocados por motivo de cancelamento de voos.

Tendo estes conceitos em mente, o EUROCONTROL, órgão de controle do espaço aéreo da União Europeia, utilizou os elementos conceituais do sequenciamento de partidas A-CDM para implementar o DMAN (*Departure Manager*), que é o sistema atualmente em atividade no gerenciamento de partidas nos aeroportos da Europa. O principal objetivo do DMAN é auxiliar o controle de aeródromo a estabelecer uma sequência ótima de partidas com o balanceamento da demanda *versus* capacidade [48].

Este sistema de planejamento visa aperfeiçoar o fluxo de partidas em um ou mais aeroportos através dos cálculos de meta de tempo de decolagem (TTOT) e meta de tempo de aprovação da inicialização (TSAT - *Target Start-Up Approval Time*) para cada voo. Os TSATs devem definir uma fila eficiente de decolagens na pista, enquanto que os TTOTs podem ser efetivamente utilizados em outras instâncias do controle do espaço aéreo.

O acordo negociado entre os órgãos ATC e as companhias aéreas é mantido estável, mas o DMAN executa os ajustes necessários conforme a ocorrência dos eventos reais. Estes ajustes podem excepcionalmente alterar os horários TSAT previamente estabelecidos, objetivando aumentar a flexibilidade da infraestrutura, a pontualidade dos voos e a eficiência do trabalho em solo.

Os voos com restrições do controle de tráfego são colocados na fila com o seu exato tempo calculado de decolagem. Para os demais voos, o DMAN determina se a aeronave está pronta para decolagem levando em conta os horários EOBT (*Estimated Off-Block Time*) e TOBT (*Target Off-Block Time*), somados ao tempo necessário para taxiamento da aeronave (EXOT) e, assim, cria uma sequência inicial de partida. Esta sequência deve respeitar os intervalos de segurança na separação das aeronaves, porém a sequência pode ser otimizada simplesmente realocando os voos de modo que o tempo médio de espera das aeronaves na fila diminua, desde que este padrão de segurança não seja violado. Agora, cada aeronave tem um TTOT.

---

<sup>2</sup>Mais detalhes a respeito destes algoritmos são apresentados na seção 5.3.

Após estes passos, o cálculo do tempo TSAT para a aeronave  $i$  é efetuado na equação 5.1, onde  $c$  é um fator de extensão parametrizado para representar a incerteza no tempo necessário para os cuidados da aeronave em solo.

$$TSAT_i = TTOT_i - c * EXOT_i, \quad (5.1)$$

Na situação ideal,  $c$  é igual a 1, fazendo com que o TSAT calculado seja o tempo necessário para que a aeronave chegue na pista no momento exato de sua decolagem imediata. No entanto, é uma boa prática estabelecer um *buffer* de até 5 aeronaves presentes na pista em casos de alta frequência de decolagens.

Bons resultados foram obtidos com a implantação das técnicas CDM no gerenciamento de partidas. Como observado na tabela 5.1, a taxa de voos iniciados no horário aumentou em aproximadamente 30% após a utilização do DMAN-CDM [29].

Tabela 5.1: Perfil das decolagens antes e depois da utilização de CDM.

Status do voo	Pré-CDM	Pós-CDM
Atrasado	21,51%	16,83%
Adiantado	27,64%	17,30%
No horário	50,85%	65,87%

### 5.2.1 Experimentos em aeroportos selecionados

A filosofia do CDM permite que o mecanismo de tomada de decisão deixe de ser apenas local, sendo assim aplicada a nível regional, ou até mesmo global. O EURO-CONTROL experimentou a abordagem em cinco dos grandes aeroportos europeus, objetivando ainda expandir os experimentos para mais treze aeroportos [29].

#### Bruxelas

A primeira tentativa foi implementada no ano de 2001, no Aeroporto Internacional de Bruxelas, contando com a colaboração do provedor ATS belga e da companhia aérea Sabena. A meta era aumentar a eficiência das operações de tráfego aéreo a partir da cooperação entre os parceiros do aeroporto. A princípio, foi constatado que grande parte da informação necessária já estava disponível, mas não era adequadamente disseminada, em parte por uma compreensão inadequada das necessidades operacionais. A coordenação entre as atividades do aeródromo e os processos ATFM era essencial para o estabelecimento de objetivos em comum entre os parceiros.

O primeiro passo foi a padronização dos processos na abordagem de marcos de controle com o objetivo comum de se calcular e cumprir o TOBT (*Target Off-Block Time*). Como resultado, conta-se a publicação de um documento procedural para o TOBT, o que balizou as operações entre os parceiros envolvidos e tornou mais fluida a tarefa de sequenciamento nas partidas.

## **Barcelona**

O experimento CDM no Aeroporto Internacional de Barcelona (El Prat) contou com a participação de duas companhias aéreas, a torre de controle e os órgãos ATC. Neste aeroporto, a alocação de *slots* era ineficiente devido ao inadequado compartilhamento de informações entre estes parceiros.

Diversas reuniões foram conduzidas a fim de se detectar os objetivos comuns, o que originou o desenvolvimento de uma ferramenta de monitoramento de tráfego capaz de identificar eventuais discrepâncias entre aquilo que estava planejado e o que de fato estava ocorrendo com a aeronave. A ferramenta favoreceu a tomada de ações corretivas por parte dos parceiros, o que culminou no sequenciamento colaborativo de decolagens.

## **Estocolmo e Helsinki**

Os aeroportos Arlanda, em Estocolmo, e Vantaa, em Helsinki, também foram utilizados para experimentos em CDM. O foco foi direcionado para a eficiência das operações através da sincronização, previsão e transparência entre os parceiros, dos quais os serviços de solo fizeram parte. Foi necessário o período de seis meses para se identificar que sistemas de informação e, sobretudo, que informações precisariam ser compartilhadas.

As simulações foram conduzidas de modo a avaliar os tempos de taxiamento e procedimentos de retomada no caso de não-cumprimento dos horários de *off-block*. Ficou claro o papel dos agentes em solo (e.g. o serviço de degelo das pistas) como os que primeiro tomam procedimentos táticos colaborativos.

Vale observar que a abordagem utilizada nestes aeroportos escandinavos difere ligeiramente dos aeroportos de Bruxelas e Barcelona. Aqui, o gerenciamento é destinado às tarefas de solo, a fim de suportar os operadores no cumprimento de sua agenda de responsabilidades e de mitigar as restrições impostas pelas limitações do aeródromo.

## **Milão**

O experimento no aeroporto de Malpensa, em Milão, tratou de identificar as lacunas em aberto nos procedimentos operacionais e no desenvolvimento de processos colaborativos a fim de se cumprir os objetivos comuns dos parceiros. Tanto os processos como os protocolos de fluxo de informação foram considerados defasados.

A solução foi a consolidação da abordagem dos marcos de controle, com foco no sequenciamento de aterrissagens e cálculo do horário de *in-block*, i.e., momento em que a aeronave passa a ocupar a posição de desembarque.

## **5.3 RBS e Compression**

A abordagem parte do princípio de que a ordem de chegada das aeronaves nos aeroportos nem sempre está de acordo com o que foi previamente programado, devido à aplicação de medidas de controle de fluxo para as mesmas. Isto ocorre porque não

há garantias quanto ao número de *inversão de pares* de voos. É computada uma inversão entre dois voos no caso em que eles executam uma operação de chegada ou saída na ordem inversa àquela que estava previamente definida.

Com o objetivo de minimizar o número de inversão de pares, o algoritmo de alocação por agendamento (RBS - *Ration by Schedule*) foi desenvolvido. Sua principal função é a alocação de *slots* baseada na ordem de ingresso dos voos no sistema (FCFS - *first come, first served*). Deste modo, os voos iriam operar de acordo com a agenda previamente publicada. No entanto, o dinamismo do cenário de tráfego aéreo imprime às aeronaves algumas condições de movimentação que não foram previamente consideradas na alocação dos *slots*, como as medidas ATFM e até mesmo o cancelamento de voos.

No caso onde determinados voos são cancelados, ocorre a liberação compulsória de seus respectivos *slots*. O algoritmo de compressão (*Compression*) foi então concebido para que os voos pudessem ser realocados na agenda de decolagens com base nas informações em tempo real [49]. A compressão busca o aproveitamento dos *slots* desalocados na fila de decolagens ao deslocar para estas posições os voos que seriam executados em um momento posterior. Tais posições são denominadas *slots de oportunidade*. Esta abordagem é historicamente eficiente como tratamento do GDP (*Ground Delay Problem*).

Como a maioria dos esforços existentes em ATFM foca na fluência e segurança do tráfego aéreo, as companhias aéreas não participam do processo de tomada de decisão, o que acarreta na distribuição desigual dos impactos das medidas restritivas entre as companhias aéreas envolvidas. Esta distribuição desigual de atrasos é conceituada como o *problema da equidade* [50].

No trabalho de Bertsimas e Gupta [50], foi utilizada uma base composta por dados provenientes dos 55 maiores aeroportos dos Estados Unidos durante um período de seis dias (divididos nas temporadas de verão nos anos 2004 a 2006). Foram apresentados os resultados iniciais de uma pesquisa de ordenação de decolagem de aeronaves, abordando conceitos de equidade com modelos de programação inteira, tendo em vista três principais paradigmas na implementação:

- RBS
- distribuição uniforme de atrasos por aeronave para cada companhia aérea
- controle de inversão de pares

É consenso entre as operadoras de linhas aéreas que o conceito de equidade (ou justiça) é o estabelecimento de uma programação que garanta que os voos cheguem ao destino na ordem prevista pelos planos de voo, que é precisamente a definição de *ration by schedule* apresentada.

No entanto, dada a gradativa redução de capacidade nos aeroportos, nem sempre é possível obter uma solução sob o paradigma RBS. Isto significa que deve haver um número mínimo de inversão de pares de voos. Um par de aeronaves ( $f, g$ ) é inversível se  $f$  e  $g$  possuem o mesmo aeroporto de destino e se o horário de chegada de  $g$  está entre o horário previsto de chegada de  $f$  e o horário de máximo atraso permitido para  $f$ .

Se na solução resultante o voo  $g$  chega antes do voo  $f$ , conta-se uma *reversa*. Desta forma, é obtido um esquema onde são feitas trocas entre os horários dos voos de modo que o sistema como um todo não tenha impacto significativo, escalonando de maneira justa a ordem de chegada das aeronaves via aplicação de medidas restritivas. Como resultado das simulações, foi introduzido um atraso 10% superior no cenário como um todo, com uma distribuição de atrasos considerada justa (portanto satisfatória) do ponto de vista particular das companhias aéreas.

## 5.4 Teoria dos Jogos no transporte aéreo

Com foco em seus interesses comerciais, as companhias aéreas buscam maior abrangência de atuação no transporte aéreo ampliando sua frota e seu leque de origens e destinos. Naturalmente, surge a necessidade da utilização de novos *slots*, o que onera as operações de controle de tráfego. Esta é a maior contribuição para o *ground holding problem* [51].

### 5.4.1 Planejamento estratégico

No que tange à alocação de *slots*, os presentes estudos na Teoria dos Jogos trabalham na etapa estratégica do voo, por meio do controle da demanda de voos a operar em aeroportos submetidos ao controle de *slots*. Este controle de demanda é realizado com o objetivo de balancear as deficiências de capacidade aeroportuária.

Vaze e Barnhart [51] apresentaram uma solução utilizando Teoria dos Jogos para o problema da demanda de companhias aéreas por *slots*. O modelo básico consiste na restrição quantitativa dos *slots* para companhias aéreas, ou seja, cada companhia aérea possui impacto limitado sobre a capacidade no aeroporto<sup>3</sup>. É então elaborado um modelo de competição por frequência de operações, onde cada companhia aérea é um jogador em um cenário multiagente. As principais variáveis deste modelo básico são:

- $S_a$ : conjunto de segmentos potenciais para a companhia aérea  $a$  com origem em um aeroporto controlado;
- $p_{as}$ : tarifa cobrada do passageiro pela companhia  $a$  no segmento  $s$ ;
- $Q_{as}$ : quantidade de passageiros transportados pela companhia  $a$  no segmento  $s$ ;
- $M_s$ : demanda total de passageiros no segmento  $s$ ;
- $C_{as}$ : custo operacional por voo da companhia  $a$  no segmento  $s$ ;
- $S_{as}$ : capacidade de transporte da companhia  $a$  no segmento  $s$ ;
- $L_a$  e  $U_a$ : mínimo e máximo de *slots* no aeroporto de origem que companhia aérea  $a$  pode operar, respectivamente;
- $[f_{as}]_{s \in S_a}$ : vetor de variáveis de decisão da companhia  $a$  no segmento  $s$ ;

---

<sup>3</sup>Aeroportos sob esta restrição serão doravante denominados *aeroportos controlados*

O modelo de otimização para a companhia aérea consiste na maximização do lucro e é descrito na equação 5.2.

$$Lucro = \sum_{s \in S_a} p_{as} Q_{as} - C_{as} f_{as} \quad (5.2)$$

Uma restrição a este lucro é o número de passageiros, condicionado aos assentos disponíveis, fatia de mercado e total *slots* de decolagem para a companhia  $a$ , conforme inequação 5.3, onde  $\alpha_s$  é o expoente da relação sigmoideal entre a fatia de mercado e a fatia de frequência e  $A_s$  é o conjunto das companhias que operam no segmento  $s$ . O cenário envolve a tomada de decisão por diversos agentes, devido ao fato de que esta fatia de mercado depende diretamente das variáveis de decisão das demais companhias aéreas.

$$Q_{as} \leq \frac{f_{as}^{\alpha_s}}{\sum_{a' \in A_s} f_{a's}^{\alpha_s}} M_s \forall s \in S_a \quad (5.3)$$

Esta abordagem tem a limitação de que apenas é considerada a fatia de frequência por cada segmento. Assim, os autores propuseram um novo modelo que contempla o perfil dos passageiros e da tarifa da companhia. A contribuição deste incremento é que os valores de frequência e tarifa foram multiplicados por fatores de elasticidade, o que faz com que a decisão dos jogadores passe a ser sequencial ao invés de simultânea. Assim, a resposta de uma companhia aérea é baseada na ação tomada pela anterior. Novamente, o modelo esbarra no pressuposto de que há ao menos duas companhias. Foi então proposta a inequação 5.4, agora considerando a entrada de concorrentes.

$$Q_{as} \leq \frac{f_{as}^{\alpha_s}}{f_{a's}^{\alpha_s}} M_s \quad (5.4)$$

A equação 5.5 agora faz sentido na busca do Equilíbrio de Nash, onde  $a'$  é um concorrente em potencial. Uma vez que a solução de equilíbrio se baseia nas decisões de frequência de todas as companhias, a decisão de uma companhia em particular é sempre ótima frente às demais.

$$f_{a's} = \operatorname{argmax}_{f>0} \left( \min \left( \frac{f_{as}}{f_{as}^{\alpha_s} + f_{as}} M_s, LF_{max} S_{a's} f \right) p_{a's} - C_{a's} f \right) \quad (5.5)$$

As simulações foram realizadas considerando o tráfego de janeiro de 2008 no aeroporto de LaGuardia, Nova Iorque (EUA), que é um aeroporto controlado. O sistema de recompensas estabelecido prevê que as companhias obtêm maior ganho quanto maior for a taxa de passageiros por *slot* alocado. Foram realizadas reduções na quantidade de *slots* disponibilizados, bem como a conseqüente diminuição dos passageiros transportados, com resultados satisfatórios para as companhias até o limite de 35% de redução nesta quantidade.

Em uma nova simulação, foi considerada a redução de capacidade devido a condições meteorológicas desfavoráveis, porém de maneira estática. O total de atrasos aumentou, ainda que este aumento não tenha sido significativo (pouco mais de 2 minutos por voo). Como resultado final, o aumento médio dos lucros da companhia

aérea foi de cerca de 16%, apesar da redução no número de passageiros transportados.

### 5.4.2 Planejamento tático

Outros estudos existentes utilizando a Teoria dos Jogos para ATFM não contemplam a etapa pré-tática do voo da aeronave, sendo limitados ao controle de área do espaço aéreo, ou seja, ao voo já em execução. No entanto, o desempenho de tais abordagens pode ser avaliado sob a ótica do agente<sup>4</sup>, uma vez que o mesmo deve sempre assumir uma postura estratégica em um cenário modelado por tal metodologia.

Wolfe *et. al.* [52], em um esforço da Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica dos Estados Unidos (NASA), desenvolveram o trabalho *A Multiagent Simulation of Collaborative Air Traffic Flow Management*. Nesta obra, os autores propuseram um modelo colaborativo para ATFM, onde cada aeronave é um agente em um jogo colaborativo. A simulação tem partida em uma escolha inicial de rotas para um determinado conjunto de aeronaves em operação no sudoeste estadunidense, sendo que cada rota tem uma capacidade específica (ao invés dos setores de controle). Esta decisão de projeto corrobora a política do agente de controle do modelo, que não permite que uma rota tenha a sua capacidade excedida. Para que isto seja possível, cada voo possui duas outras rotas alternativas, que são tomadas no caso da aplicação de uma medida restritiva. Pode-se perceber que é um clássico problema de demanda *versus* capacidade.

Para avaliar o desempenho do modelo, são utilizadas quatro principais estratégias para a definição da rota das aeronaves:

1. rota direta (rotas com capacidade infinita);
2. atribuição da melhor rota alternativa disponível (em ordem arbitrária);
3. atribuição da melhor rota alternativa disponível de acordo com o peso da aeronave (ótimo global);
4. planejamento pela companhia aérea.

Os agentes neste modelo poderiam agir segundo políticas agressivas, moderadas ou conservadoras, sendo que o algoritmo básico executa três tarefas de maior relevância: cálculo do atraso por aeronave, cálculo do atraso por número de passageiros e redistribuição das rotas baseada nos parâmetros de cada aeronave em particular. Como resultado global da simulação, o uso de estratégias mistas de obtenção de rotas não foi satisfatório, o que torna imperativo que a aeronave adote uma política bem definida de atuação. No entanto, a política predominantemente agressiva é altamente degradante para o modelo. Portanto, é possível chegar a uma solução ótima através de uma negociação entre os agentes.

Este resultado é importante no sentido da definição do comportamento do jogador, uma vez que este busca aumentar sua eficiência, sem que tenha a necessidade

---

<sup>4</sup>Os *agentes* são os jogadores em uma modelagem de Teoria dos Jogos. Para mais detalhes, consultar o capítulo 2.1.

direta de considerar os demais agentes. É essencial que tal comportamento seja regido por políticas de controle, pois, caso contrário, a postura gulosa dos jogadores agressivos poderia levar outros agentes à situação de *starvation*, ou seja, ao passo que um determinado grupo de agentes alcança total ou parcialmente seus objetivos, outros grupos jamais terão a possibilidade de êxito.

## 5.5 Problemas encontrados nas abordagens existentes

Apesar dos bons resultados, o A-CDM esbarra no problema da competição por *slots* em tempo real por parte das aeronaves [28]. Ainda que os agentes tenham o objetivo comum da otimização do cenário global quanto à redução dos atrasos, existem conflitos de interesse localmente. O modelo baseado em restrições trata efetivamente estes conflitos. No entanto, este modelo de alocação de *slots* não garante que a sequência montada esteja livre de atrasos desnecessários, o que resolve apenas parcialmente o *Ground Holding Problem*. Um outro problema é a definição incompleta dos benefícios esperados em termos quantitativos, o que torna inflexível a tomada de decisão e gera resultados sub-ótimos.

Um ponto limitante na aplicação do RBS é o fato de que os órgãos ATFM geralmente priorizam as operações de chegada de aeronaves, haja vista as preocupações com a garantia da segurança e com a complexidade operacional. O impacto desta priorização é a inserção de atrasos aos voos aguardando partida, o que viola o conceito de equidade. Ainda, a capacidade aeroportuária instalada não é preocupação desta abordagem em particular [49] e eventualmente ocorre certa degradação do sistema, uma vez que a busca pela equidade pode contribuir para o aumento do atraso global.

Considerando a solução em Teoria dos Jogos proposta para a etapa estratégica, a alocação de *slots* é limitada por demanda, o que sub-utiliza a capacidade instalada. Ainda, a redução substancial dos *slots* alocados teve seu foco no lucro das companhias, sem tomar em consideração a receita relacionada à *entidade* aeroporto, o que poderia eventualmente inviabilizar a solução. Outro ponto negativo é a atribuição estática de valoração. De fato, não há entidades de controle envolvidas neste processo. Isto apenas descreve uma situação ideal, o que entra em conflito com o cenário operacional dinâmico do tráfego aéreo.

A aplicação no planejamento tático contempla este problema, ao tratar dinamicamente a necessidade de reposicionamento em rota das aeronaves. No entanto, não conta com uma etapa de pré-processamento. De fato, os modelos que trabalham com dados estáticos e dinâmicos em conjunto tendem a apresentar resultados mais precisos, como em [10]. Ao se analisar o perfil de planejamento no transporte aéreo, a etapa pré-tática mostra-se essencial para o balanceamento das medidas ATFM.

# Capítulo 6

## Modelagem em Teoria de Jogos para o CoDMAN

Cada aeronave deseja obter o melhor *slot* de decolagem possível. No mundo real, os agentes em um cenário com esta natureza são predominantemente não-cooperativos, o que motiva a escolha metodológica apresentada neste capítulo. Em um espaço com  $n$  agentes que tomam decisões para maximizar sua eficiência, podem ser adotados os conceitos de Teoria dos Jogos, pois a ação de cada agente é dependente das ações dos demais. Na realidade, a ação de um agente é dependente da combinação de várias ações, que convergem para o Equilíbrio de Nash [15], situação na qual nenhum jogador fica em vantagem se suas ações forem decididas isoladamente.

O processo de modelagem formal de uma situação como um jogo requer que sejam explicitamente enumerados os jogadores e suas opções estratégicas, considerando suas preferências e reações. Este capítulo aborda este tópico, fundamentando na seção 6.1 a escolha metodológica. A seção 6.2 descreve a modelagem do cenário, ou seja, do ambiente onde o jogo será desempenhado, com uma descrição detalhada dos seus atributos e fatores de influência. A seção 6.3 descreve o processo de modelagem dos jogadores neste jogo de alocação, que são as aeronaves a decolar. É definida também a função de recompensa destes agentes.

Por fim, a seção 6.4 apresenta o formato do jogo, com seu fluxo de atividades e sua modelagem segundo um protocolo de ofertas alternadas na negociação dinâmica entre os agentes.

### 6.1 Teoria dos Jogos no Sistema CoDMAN

O processo de sequenciamento de partidas de aeronaves nos aeroportos coordenados é o foco deste estudo. Por meio desta modelagem, deseja-se a validação de um arcabouço técnico a fim de que seja satisfeito o gerenciamento colaborativo de partidas. Por este motivo, a modelagem proposta neste trabalho recebe o nome de CoDMAN - *Collaborative Departure Management*.

### 6.1.1 Justificativa da abordagem metodológica

O espaço de atuação das aeronaves sujeitas ao processo de alocação de horários de decolagem pode ser visualizado como um ambiente composto de  $n$  jogadores, ou agentes, onde cada um possui uma curva de ganhos cujos valores são definidos por uma função de utilidade. Como não é sempre possível aumentar a função de utilidade de um agente sem afetar a de outros agentes, busca-se alcançar um estado ótimo, chamado de Ótimo de Pareto<sup>1</sup>.

O Equilíbrio de Nash relaciona-se ao quadro competitivo dos agentes, enquanto que o Ótimo de Pareto relaciona-se ao quadro colaborativo. Em muitas soluções de jogos, busca-se determinar o Equilíbrio de Nash e o Ótimo de Pareto. O gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo presumidamente é um caso em potencial para a aplicação da Teoria dos Jogos pois, neste contexto, os voos são os agentes que buscam maximizar a sua eficiência que, em termos genéricos, se reflete na redução dos custos introduzidos pelos atrasos. Os agentes concorrem pelo uso dos recursos de controle de tráfego, condicionando suas ações às ações dos demais voos na tarefa de buscar o cumprimento dos horários agendados de pouso e decolagem.

Vale observar que o sequenciamento de partidas é um clássico problema de alocação. Após o estudo da seção 2.4, pressupõe-se que uma alocação eficiente de *slots* para aeronaves deve ser descrita por coalizões com a maior quantidade possível de aeronaves, de modo que suas preferências estritas pelos horários de decolagem sejam satisfeitas. No entanto, a racionalidade das aeronaves, que exercem o papel de agentes no jogo, é limitada pelo mecanismo de controle imposto pela entidade arbitral. Esta limitação não garante que as aeronaves sejam atendidas em suas preferências estritas, o que naturalmente força situações de negociação. Estabelece-se então a figura do árbitro da negociação, que define políticas de validação de ofertas e aloca recursos de maneira impositiva no caso de negociações infrutíferas.

### 6.1.2 Alocação colaborativa

O presente trabalho propõe a utilização dos conceitos de Teoria dos Jogos no planejamento tático da realização de um voo, distribuindo de maneira eficiente e coordenada os *slots* existentes, conforme demanda. É imprescindível que os agentes envolvidos participem de um jogo com informação perfeita, ou seja, onde há pleno conhecimento a respeito de si mesmos e dos demais agentes.

Este compartilhamento de informações é a base da metodologia CDM (ver seção 3.3), que conta com a colaboração conjunta de todos os agentes. No caso do CoDMAN, estes agentes são as aeronaves, que negociam entre si a ocupação dos *slots*. A Teoria dos Jogos se mostra adequada no tratamento de conflitos e, por este motivo, foi escolhida para a fundamentação metodológica do sistema.

A contribuição desta abordagem reside no fato de que uma parte das responsabilidades incidentes sobre os controladores de torre nos aeroportos é transferida diretamente para os agentes racionais. Estes atuarão em um cenário onde a força de negociação será fator determinante no sucesso da alocação de *slots*, sendo satisfeitas todas as exigências operacionais impostas por legislação e por restrições

---

<sup>1</sup>A seção 2.3 pode ser consultada para a compreensão deste conceito de optimalidade.

aeroportuárias. Tais exigências operacionais farão parte dos requisitos de arbitragem do mecanismo de negociação.

## 6.2 Modelagem do cenário

O cenário será modelado com base nos parâmetros operacionais do aeroporto e da área terminal:

- $F$ : conjunto dos voos ativos no aeroporto e na TMA. São voos ativos aqueles que ainda são alvo de processamento, discriminados em dois subconjuntos principais:
  - aeronaves em solo ( $F_g$ ), que inclui aquelas que já aterrissaram ( $F_g^-$ );
  - aeronaves no ar ( $F_a$ ), que inclui aquelas que já decolaram ( $F_a^-$ );
- $I_p$ : capacidade aeroportuária instalada, condicionada às posições de estacionamento ( $I_p^f$ ) e às pistas de rolagem ( $I_p^r$ );
- $C_a(t)$ : capacidade de aterrissagens no aeroporto no instante  $t$ ;
- $C_d(t)$ : capacidade de decolagens no aeroporto no instante  $t$ ;
- $Q_a$ : conjunto das aeronaves na TMA aguardando autorização para pouso;
- $Q_d$ : conjunto das aeronaves no pátio do aeroporto aguardando autorização para decolagem;
- $K$ : custo total dos atrasos;

O parâmetro  $I_p$  é determinado por dois fatores, que são: número de *fingers* operacionais e o número de pistas destinadas à decolagem ou à aterrissagem (*runways*) que podem ser utilizadas simultaneamente, definidos respectivamente como  $I_p^f$  e  $I_p^r$ . A quantidade de pistas sendo utilizadas para aterrissagem e decolagem no instante  $t$  são, respectivamente, iguais a  $I_a(t)$  e  $I_d(t)$ .

Assim que uma aeronave solicita autorização de *push-back*, ela é inserida no conjunto  $Q_d$ , tornando-se um voo ativo<sup>2</sup>. A aeronave sai deste conjunto assim que decolar, sendo então colocada em um conjunto denominado  $F_a^-$ . Em contrapartida, um voo é removido do conjunto  $Q_a$  assim que a aeronave toca a pista de pouso, passando a integrar o conjunto  $F_g^-$ .

Os conjuntos  $F_a^-$  e  $F_g^-$  são, respectivamente, o conjunto das aeronaves na TMA que não vão descer neste dado aeroporto e o conjunto das aeronaves em solo que não possuem pretensão iminente de decolagem. Estes dois conjuntos de aeronaves acabam por impactar o cenário, porém sem fazer parte dos voos processados pelo CoDMAN. O seu impacto se resume na alteração da capacidade de gerenciamento do aeroporto.

Neste modelo inicial, a capacidade de decolagem é definida pela quantidade de aeronaves que o aeroporto pode despachar, obtida através da equação 6.1. Este

---

<sup>2</sup>Mesmo que ainda não tenha tido início, um voo é considerado ativo sempre que possuir direto interesse no resultado do processamento.

número é simplesmente a quantidade de pistas disponíveis para utilização no instante  $t$ , observando-se a prioridade aos pousos para a utilização das pistas. Vale observar que não é feito o trabalho de otimização no sequenciamento de aterrissagens, que são processadas segundo uma fila simples.

$$C_d(t) = I_p^r - (I_a(t) + I_d(t)) \quad (6.1)$$

A capacidade de aterrissagem é descrita pela equação 6.2. O fator  $I_p^f - F_g^-$  define a capacidade de ocupação do pátio do aeroporto, enquanto que o fator  $I_p^r - (I_a(t) + I_d(t))$  define a quantidade de pistas livres para operação no instante  $t$ .

$$C_a(t) = \min\{I_p^f - F_g^-, I_p^r - (I_a(t) + I_d(t))\} \quad (6.2)$$

A equação 6.3 define o custo total dos atrasos dos  $n$  voos ativos através da soma dos custos dos atrasos inerentes a cada voo  $i = 1, \dots, n$ .

$$K = \sum_{i=1}^n k_i \quad (6.3)$$

### 6.3 Modelagem das aeronaves

As aeronaves são definidas como agentes atuando no cenário, sendo necessário ranqueá-las segundo alguma métrica. Para tanto, são definidos os atributos para cada aeronave  $F_i$  como segue:

- $t_d$ : horário de decolagem previamente alocado para a aeronave com base no plano de voo;
- $t_a$ : horário previsto de aterrissagem no aeroporto de destino;
- $v$ : velocidade de cruzeiro;
- $t_f$ : duração estimada do voo até seu destino final;
- $\phi$ : fator de carga da companhia aérea, que é um mapeamento a número real no intervalo  $[\frac{1}{2}, 1]$ ;
- $D$ : máximo período de atraso aceitável para a aeronave, em minutos;
- $p$ : número de passageiros presentes na aeronave;
- $B$ : porte da aeronave, mapeado em um número inteiro no intervalo  $[1, 3]$ ;
- $\sigma$ : significância da aeronave;
- $l$ : atraso imposto à aeronave, em minutos;
- $k$ : custo ponderado individual do atraso, que é a função de recompensa da aeronave;
- $S$ : *slot* alocado para a aeronave;

O fator  $B$  foi incluído na modelagem devido à exigência da separação mínima entre as decolagens, motivada pelo surgimento de uma esteira de turbulência quando da movimentação das aeronaves, conforme descrito na seção 4.5.3. Ainda, pressupõe-se que o consumo de combustível é mais elevado em aeronaves de maior porte, o que acarreta um alto custo no caso de uma situação de espera em ar (AHP).

As aeronaves utilizadas no transporte de passageiros são utilizadas de maneira contínua, sendo que o aeroporto de origem para um voo  $F_i$  é exatamente o aeroporto de destino de um voo executado pela mesma aeronave encerrado momentos antes. Logo, se uma aeronave atrasa, os próximos voos operados por ela também vão atrasar. Esta é a importância do fator  $D$ , que delimita uma janela máxima aceitável para o atraso do voo  $F_i$ .

A equação 6.4 determina a significância de uma aeronave em termos de sua lotação, seu porte e da distância ao aeroporto de destino, calculada em dezenas de milhas náuticas. Uma aeronave apresentando estas características mais elevadas é considerada mais significativa para o cenário, pois possui um maior impacto operacional associado.

$$\sigma = vt_f B + p \quad (6.4)$$

Este índice de significância é utilizado para o cálculo do custo ponderado do atraso individual, dado pela equação 6.5. O custo é dado em uma unidade genérica, não necessariamente monetária, mas que reflete o impacto de um atraso para a aeronave. A escolha da quantidade de passageiros ( $pax$ ) como um dos atributos da significância é fundamentada no fato de que os custos operacionais são maiores para voos mais utilizados, além do fato de cada passageiro é afetado por um custo individual, desconhecido pela companhia. Além destes fatores, ainda existe o custo de imagem para a companhia aérea, que é proporcional ao volume de passageiros afetados pelo atraso e à correspondente repercussão popular. O fator de carga é um atributo que mensura a influência da companhia aérea proprietária da aeronave no cenário aeroportuário em questão.

$$k = \frac{l\phi}{D}\sigma \quad (6.5)$$

## 6.4 Negociação de *slots*

Em um primeiro momento, as aeronaves são alocadas na fila de *slots* com a organização FIFO<sup>3</sup>. Cada aeronave  $F_i$  é inserida no sequenciamento com o objetivo primário de anular  $k_i$ , o que de fato acontece na situação ideal. No entanto, ao desejar ocupar uma posição já ocupada por um outro voo, a aeronave a ser inserida força a manipulação desta fila, o que imprime atrasos a alguns (ou todos) voos considerados. Esta situação é ilustrada na figura 6.1. Naturalmente, o atraso real de um voo em estado de espera em solo é igual a  $t_r - t_d$ , onde  $t_r$  é o horário real de decolagem.

---

<sup>3</sup>Sequenciamento onde a saída da fila respeita exatamente a ordem de entrada (*First-in, first out*).

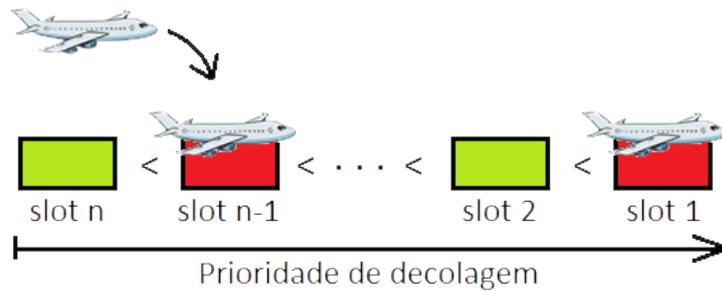


Figura 6.1: Conflito entre duas aeronaves na tentativa de ocupação de um *slot*.

A negociação entre as aeronaves deve ser implementada de maneira colaborativa com a observância das premissas do CDM. O objetivo da negociação é a minimização do custo global dos atrasos, porém com o menor atraso individual possível. Para tanto, uma aeronave pode adotar uma das seguintes ações durante a negociação:

1. tentar capturar o *slot* seguinte, ganhando uma posição na fila;
2. ceder seu *slot* para outra aeronave, perdendo uma posição na fila;
3. permanecer em seu *slot*.

O funcionamento básico do algoritmo proposto para alocação de *slots* é descrito pelo diagrama na figura 6.2. Neste diagrama, nota-se que é possível elaborar o sequenciamento para duas modalidades diferentes de planejamento, que são a alocação estática (sem movimentação) e dinâmica (com movimentação). A atividade dos voos no tráfego exige que seja constantemente monitorado o desempenho das aeronaves, sendo escolhida a janela de duas horas a partir do horário corrente na simulação.

Sendo detectado o conflito de interesses, surge uma situação de negociação e o agente recebe um *payoff*. Este *payoff* não é diretamente utilizado como atributo de prioridade no sequenciamento, mas é útil para a mensuração da qualidade da negociação.

A importância da negociação é dar às aeronaves uma oportunidade de ajustarem seus *slots* de partida tendo como cerne os seus interesses individuais, ou seja, busca-se de maneira egoísta a melhor posição possível na fila de decolagens. Seus interesses serão submetidos ao crivo do aeroporto, que validará ou não a oferta.

Sendo assim, cada aeronave, exercendo o papel de *proponente*, poderá propor uma oferta aceitável. A consequência é a elaboração de uma oferta que lhe trará maior benefício, ao passo que as restrições do árbitro são observadas e a aeronave *oponente* acaba por considerar plausível tal oferta (mesmo que esta não seja aceita *a priori*).

A proposição de ofertas pode ser entendida como a sugestão de uma das ações possíveis, determinada com base na configuração atualizada dos parâmetros da aeronave. O relaxamento das ofertas é incrementado a cada iteração, considerando-se o gradiente de impaciência da aeronave proponente. Isto faz com que a aeronave seja mais agressiva ou mais retraída nas ofertas subsequentes. Como este é um

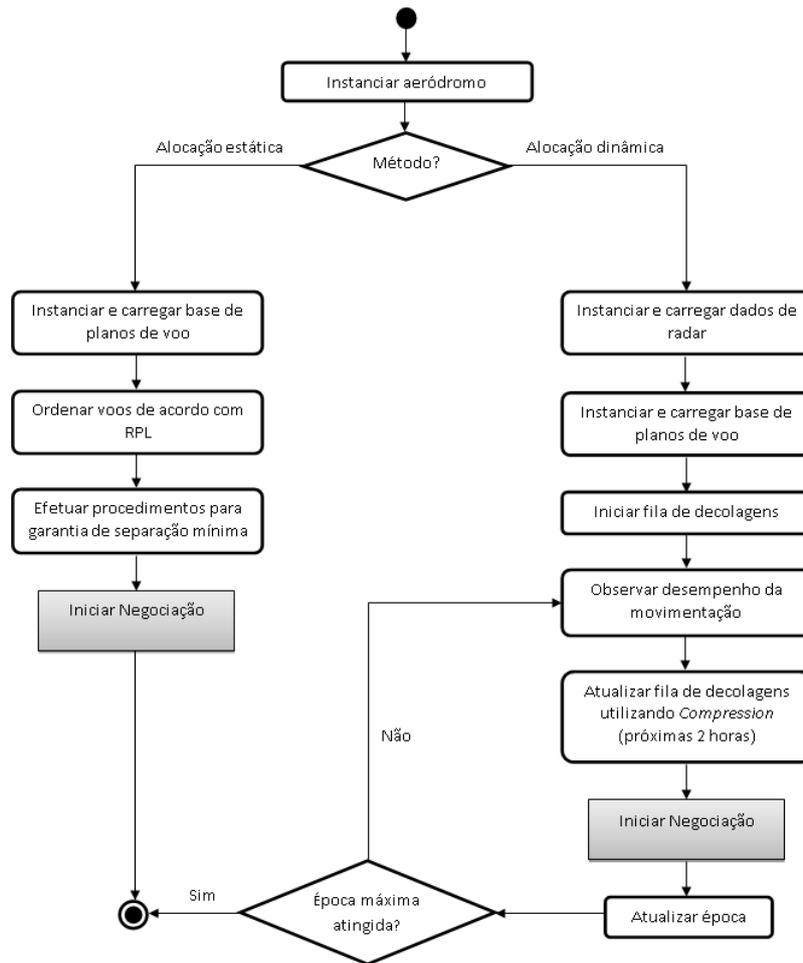


Figura 6.2: Fluxograma básico de alocação de *slots*.

jogo de informação perfeita, o próprio conhecimento a respeito dos demais agentes pode vir a tornar a aeronave uma entidade mais cooperativa, ao reconhecer que certos agentes são mais prioritários, dado o sucesso na comparação dos parâmetros de ambos.

Se a oferta de uma aeronave for considerada inválida, ela automaticamente perde a negociação, sendo acatada a última oferta válida da aeronave oponente. Caso contrário, eventualmente a negociação entre as duas aeronaves não culminará num acordo e, portanto, a entidade representativa do aeroporto irá impor a decisão mais interessante para o cenário global. Vale ressaltar que, como regra operacional, a prioridade é dada aos pousos das aeronaves (por motivos de custo e segurança) e, portanto, esta propriedade terá forte influência na decisão.

O fluxo básico do processo de negociação é evidenciado pela figura 6.3. As atividades neste fluxograma são as seguintes:

1. A fila de decolagens, que pode ser a alocação inicial ou o resultado de uma negociação anterior, é completamente percorrida a partir da aeronave cujo horário de decolagem alocado é o mais próximo ao horário corrente.

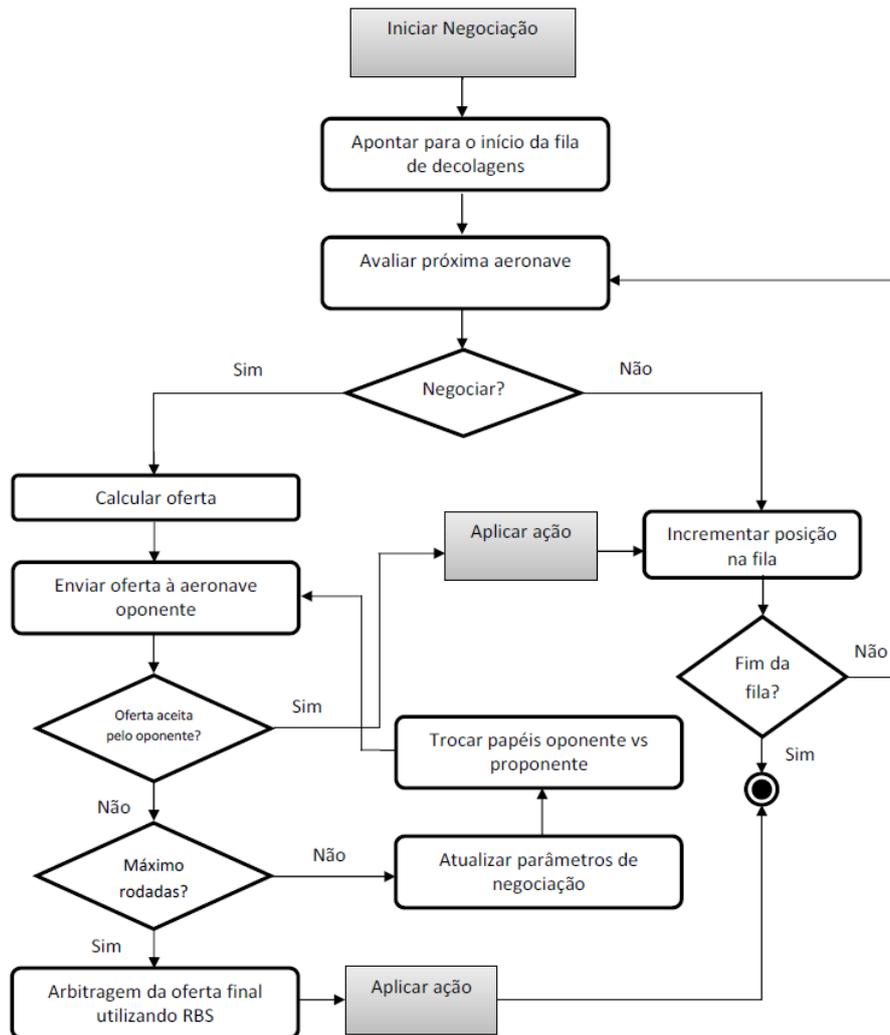


Figura 6.3: Processo de percorrimento da fila de decolagens para negociação

2. Se a aeronave tiver interesse em negociar, ela irá executar a tarefa de calcular uma oferta e enviá-la à aeronave que está imediatamente à sua frente na fila.
3. Se esta aeronave oponente aceitar a oferta, a ação é aplicada e a aeronave seguinte na fila é avaliada.
4. Caso contrário, o fator de desconto é incrementado e uma nova oferta é elaborada, desta vez pela aeronave oponente.
5. Se nenhuma oferta for aceita, o aeroporto decidirá qual delas é a mais interessante a nível global, e tal oferta será aplicada.

#### 6.4.1 Negociação de *slots* em jogos extensivos

A modelagem estratégica de um jogo não agrega a este a característica temporal [13]. A negociação dentro do CoDMAN deve ser matematicamente modelada de modo a considerar o aspecto dinâmico da interação entre os agentes. Para tal, a

formalização de um jogo em sua forma extensiva mostra-se adequada. Este modelo tem a vantagem de se estabelecer uma sequência cronológica das ações utilizadas, o que permite que o agente possa elaborar um plano de ação, não apenas no começo do jogo, mas também em qualquer momento onde uma decisão precisa ser tomada.

No jogo desenvolvido no CoDMAN, negociam duas aeronaves que conflitam quanto à utilização de um determinado *slot*, ou seja, quando o horário de decolagem de ambas coincide. Isto agrega um atraso à aeronave que deseja ocupar o *slot* que já está ocupado. Observe que nem sempre a situação de negociação se faz necessária, mas qualquer combinação dois-a-dois das aeronaves no cenário configura um estado potencialmente válido no modelo. A avaliação do cenário completo contendo cada um destes estados é computacionalmente intratável, o que força a simplificação da árvore de negociação. Para os casos onde não é necessária a negociação, entende-se que o jogo já está em estado de equilíbrio e, portanto, poupa-se o esforço da modelagem.

Quando duas aeronaves  $f_1$  e  $f_2$  iniciam uma negociação, a aeronave  $f_1$  sugere à aeronave  $f_2$  uma das seguintes propostas:

- avançar (*adv*): é fornecido um *slot* em um horário anterior ao que está assinalado para  $f_2$ . Talvez seja interessante a  $f_2$  a aceitação da proposta;
- atrasar (*del*):  $f_2$  recebe a oferta de atrasar seu horário de *push-back* com a finalidade de liberar seu *slot* para  $f_1$ . De modo geral, esta situação não é interessante para  $f_2$ ;
- permutar (*swp*):  $f_2$  recebe a proposta de trocar seu *slot* com  $f_1$ . O caráter parcialmente colaborativo do jogo favorece esta decisão.

Dadas estas três alternativas, a aeronave  $f_2$  pode decidir por uma das três ações:

- aceitar (*acc*):  $f_2$  aceita a proposta e recebe a recompensa cabível;
- recusar (*rej*):  $f_2$  rejeita a oferta e mantém o seu custo de atraso, enquanto que  $f_1$  deve arcar com a intervenção do árbitro da negociação. A rejeição sumária geralmente está relacionada a uma oferta inaceitável, seja para  $f_2$ , seja para a entidade aeroportuária;
- contra-atacar (*ctr*):  $f_2$  elabora uma contra-oferta, reiniciando o processo de negociação e tornando-se o agente ativo da barganha.

Este processo interativo pode ser modelado como uma árvore conforme a apresentada na figura 6.4, onde o agente  $f_1$  sugere uma dentre as três ações possíveis (*adv*, *del*, *swp*) e obtém do agente  $f_2$  uma dentre as três respostas possíveis (*acc*, *rej*, *ctr*). Os *payoffs* de  $f_1$  e  $f_2$  são iguais a  $u_1$  e  $u_2$ , respectivamente<sup>4</sup>. Repare que a atribuição de recompensa é imediata nos casos de aceitação ou rejeição, ao passo que a negociação pode prosseguir indefinidamente quando o jogador  $f_2$  decide pela contra-oferta. Nesta figura, foram suprimidos os índices  $t_i$ , sem prejuízo da noção de ordem cronológica. No caso, cada nível da árvore é uma etapa temporal.

---

<sup>4</sup>Os símbolos + e – após a função de utilidade são um abuso de notação utilizado para indicar que o resultado para o agente foi positivo ou negativo.

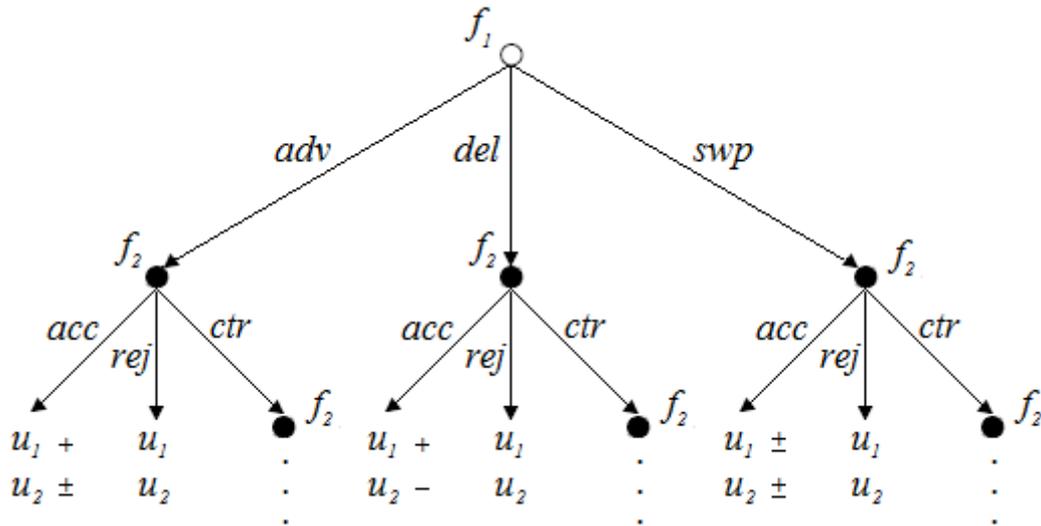


Figura 6.4: Árvore de negociação primordial entre duas aeronaves.

### 6.4.2 Adaptação do modelo truncado de Rubinstein

O modelo truncado de Rubinstein classicamente descreve a interação entre dois agentes que negociam a divisão de determinada quantia monetária, ou um valor real limitado a certo intervalo. Para que este protocolo possa ser utilizado no contexto colaborativo do sequenciamento de partidas, é necessária a flexibilização do modelo a fim de que o objeto de negociação, que neste contexto são os *slots* a serem alocados, seja propriamente representado.

No caso da negociação de *slots*, não há unidade de valor divisível. Na verdade, a negociação consiste em imprimir ao oponente uma alteração no seu horário de decolagem alocado *a priori*. A recompensa dos jogadores é assimétrica, pois a soma das recompensas não é limitada a um intervalo específico como no modelo clássico. A recompensa para o jogador consiste na equação 6.5, ou seja, a negociação mais interessante é aquela onde o custo do atraso é minimizado. Para fins de simplificação, pode-se entender a utilidade como um número negativo que o jogador tenta aproximar a zero.

A figura 6.5 ilustra como o protocolo de Rubinstein é adaptado ao CoDMAN. Cada oferta consiste na proposição de uma tupla  $(x_i, y_i)$  tal que  $x_i, y_i \in \mathbb{R}$ , onde  $x_i$  é o atraso atribuído à aeronave  $f_1$  e  $y_i$  é o atraso atribuído à aeronave  $f_2$  num instante  $i$ . Pelo modelo, o jogo pode prosseguir indefinidamente. No entanto, é estabelecido um limite de rodadas de negociação, o que pode culminar em um impasse. Caso isto ocorra, o árbitro seleciona a aplicação de alguma das ofertas anteriores tal que o custo para o cenário aeroportuário seja o menor possível.

Esta situação é formalizada na equação 6.6, onde  $f_1$  e  $f_2$  recebem, respectivamente, os *payoffs*  $-\delta^i k_1(x_r)$  e  $-\delta^i k_2(y_r)$ . O valor  $K'(x_i, y_i)$  é o custo global resultante da aplicação do atraso  $x_i$  à aeronave  $f_1$  e do atraso  $y_i$  à aeronave  $f_2$ , na  $i$ -ésima

oferta. Os valores  $x_0$  e  $y_0$  equivalem aos valores correntes de atraso para as aeronaves.

$$\begin{aligned} & -\delta^i k_1(x_r) \\ & -\delta^i k_2(y_r) \end{aligned} \quad | \quad K^r(x_r, y_r) = \min(K^r(x_i, y_i)), 0 \leq r \leq i \quad (6.6)$$

É importante ressaltar que a função de custo tem interesse inverso para o agente. Esta é a razão pela qual o *payoff* dos jogadores sempre é multiplicado por  $-1$ . Ainda, uma terceira opção é agregada à árvore clássica de Rubinstein, que é a opção *rej*. Neste caso, o oponente abandona sumariamente a negociação, sendo necessária a arbitragem da oferta. Naturalmente, isto aumenta o custo total do processo de barganha e, por isso, o fator de desconto é incrementado. Outra alteração quanto ao modelo clássico de Rubinstein é que o fator  $\delta$  deve ser superior a 1, já que os valores  $x$  e  $y$  não estão restritos a intervalos específicos, tampouco estão mutuamente condicionados.

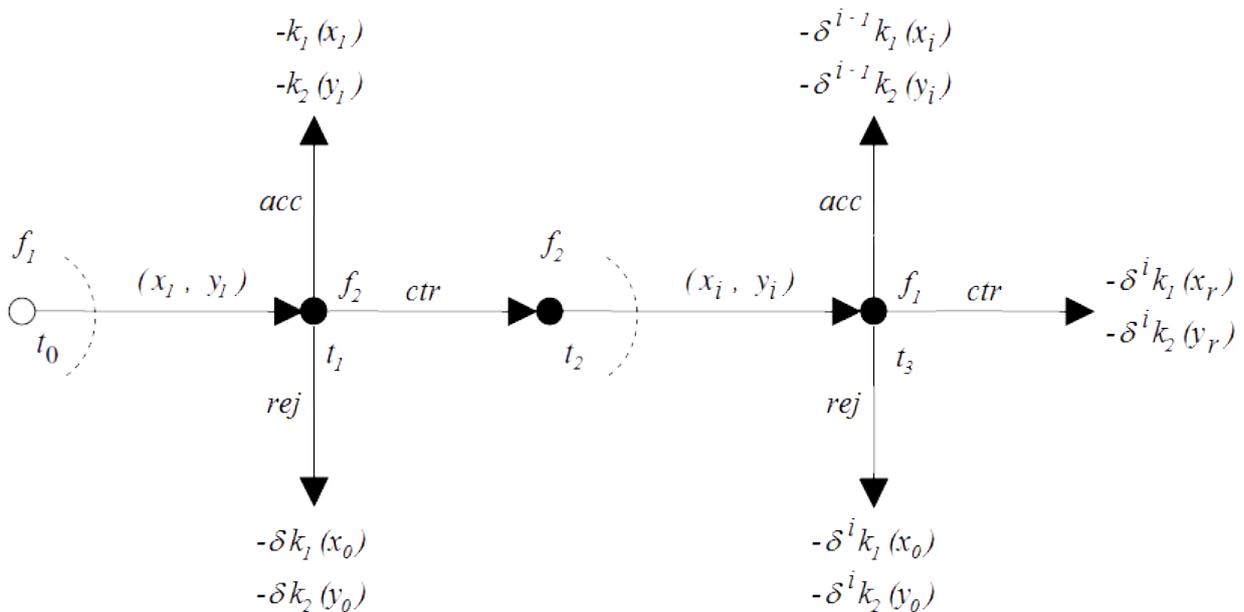


Figura 6.5: Modelo de Rubinstein adaptado ao CoDMAN.

Na implementação, o fator de desconto da negociação é calculado a partir da ponderação do horário de *off-block* das aeronaves, a fim de se obter um *gradiente de impaciência*  $\gamma_i$  para a aeronave  $f_i$ . Este argumento será um indicativo de quão urgente é a conclusão da negociação para esta aeronave, conforme a equação 6.7. Nesta equação,  $w$  é o máximo período, em minutos, onde é possível negociar. Ainda,  $t_{obt}$  é o horário real de *off-block* e  $t_{cur}$  é o horário corrente. A igualdade entre estes dois fatores denuncia o exato momento da partida da aeronave, situação na qual não há possibilidade de negociação (a aeronave já deixou a fila de decolagens). Logo,  $\gamma$  pondera o tempo restante para a decolagem. Para fins de simulação, sendo esta razão igual a 1, entende-se que a janela de tempo para as negociações está encerrada e a aeronave não mais vai alterar sua posição na fila, salvo pela aplica-

ção de medida restritiva de espera em solo. O parâmetro  $w$  é igual para todas as aeronaves, fixado em 10 minutos.

$$\gamma = \frac{w}{\max(w, t_{obt} - t_{cur})} \quad (6.7)$$

O fator de desconto  $\delta$  é inicializado conforme a equação 6.8. Caso seja necessária sua aplicação, a utilidade da aeronave é descontada (o custo da oferta aumenta na ordem de  $\delta$  a cada passo iterativo).

$$\delta = 1 + \gamma_1 \gamma_2 \quad (6.8)$$

### 6.4.3 Equilíbrio perfeito em subjogos

Dado um perfil de estratégias  $s$  num jogo dinâmico com informação perfeita, o resultado do jogo associado a este perfil é imediatamente definido a partir do caminho associado a  $s$ . Ou seja, o ganho de cada jogador é obtido de maneira unívoca a partir de um plano estratégico de deslocamento pela árvore. Este ganho, chamado de utilidade esperada, é definido simplesmente como  $U_i(s_i, s_{-i})$  para o jogador  $i$  e para os demais, respectivamente.

Deste modo, um perfil de estratégias  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$  é um equilíbrio de Nash em um jogo dinâmico se nenhum jogador  $i$  pode obter uma maior utilidade esperada ao alterar sua estratégia se os demais jogadores conservarem suas escolhas estratégicas. De maneira equivalente, esta afirmação pode ser definida na inequação 6.9, onde  $s'_i$  é qualquer estratégia alternativa para o jogador  $i$ .

$$U_i(s_i, s_{-i}) \geq U_i(s'_i, s_{-i}) \forall i = 1, \dots, n \quad (6.9)$$

Iterativamente, o equilíbrio de Nash em um jogo na forma extensiva pode ser encontrado através do método de *indução retroativa* [21]. Para isto, a análise do jogo começa em sua conclusão, *i.e.*, na jogada final. Considera-se a decisão de um jogador em um nó cujos sucessores são nós finais. Naturalmente, este jogador irá adotar a jogada que lhe for mais favorável, sendo então possível eliminar todas as outras estratégias dominadas.

Feita esta análise para todos os nós finais, é decrementado um nível na árvore, onde os nós finais agora são aqueles cujos sucessores foram verificados na etapa anterior. São então excluídas as estratégias dominadas e a verificação prossegue até que se alcance o nó inicial. O resultado será uma descrição das escolhas ótimas para cada jogador em cada um de seus nós de decisão. De fato, todo perfil de estratégias obtido por indução retroativa em um jogo dinâmico finito com informação perfeita é um equilíbrio de Nash desse jogo [21].

A estrutura sequencial de um jogo  $G$  em formato extensivo permite avaliar fragmentos isolados deste jogo, desde que tais fragmentos sejam estrategicamente consistentes. Isto significa dizer que cada uma destas subdivisões é um jogo em particular e, portanto, um subjogo próprio de  $G$ . O jogo apresentado na figura 6.5 é um exemplo desta situação. Observe que esta interação estratégica contempla apenas duas aeronaves dentre todas aquelas que influenciam o cenário do jogo de alocação.

## Consistência estratégica da negociação de aeronaves

É necessário demonstrar a validade da hipótese de que este mecanismo de alocação apresenta uma convergência comportamental entre as aeronaves que negociam. Sendo assim, deve ser possível encontrar um ponto de equilíbrio em cada subjogo próprio quando da barganha entre duas aeronaves conforme a figura 6.5. Como premissa de partida, tem-se que, no instante  $t_0$ , a utilidade de  $f_1$  é igual a  $-k_1(x_0)$  e a utilidade de  $f_2$  é igual a  $-k_2(y_0)$ , que são os custos correntes dos atrasos. Agora, utiliza-se a indução retroativa sobre este protocolo adaptado de Rubinstein:

### 1. Nós do tipo $t_3$ : oferta final

Se aceitar a oferta de  $f_2$ , a aeronave  $f_1$  terá utilidade  $-\delta^{i-1}k_1(x_i)$ . Entretanto, é possível elaborar uma contra-oferta a fim de que se obtenha uma utilidade igual a  $-\delta^i k_1(x_{i+1})$ . A dúvida reside no fato de que  $f_1$  não sabe se esta é a rodada final, o que poderia lhe trazer um benefício menor caso a melhor oferta da barganha tenha sido elaborada por  $f_2$ . Nesta situação, sua utilidade será  $-\delta^i k_1(x_r)$ . A melhor escolha será, portanto:

- aceitar (*acc*), se  $-\delta^{i-1}k_1(x_i) \geq -\delta^i k_1(x_r)$ ;
- contra-atacar (*ctr*), se  $-\delta^{i-1}k_1(x_i) < -\delta^i k_1(x_r)$ ;
- recusar (*rej*), se  $-\delta^i k_1(x_0) > -\delta^i k_1(x_r)$ .

### 2. Nós do tipo $t_2$ : elaboração de contra-oferta

A aeronave  $f_2$  decide entre elaborar uma contra-proposta aceitável ou inaceitável. Se tal proposta for aceitável, a oferta será aquela que lhe trará o menor custo possível desde que  $f_1$  tenha motivação em colaborar, jogando então a estratégia *acc*. Se  $k_2(y)$  for menor, a proposta já se torna inaceitável pelo oponente, com duas possibilidades:

- oponente joga *ctr*, o que incrementa o fator de desconto e transmite ao atual proponente o ônus da decisão entre acatar ou não a oferta;
- oponente joga *rej*, tornando seu *payoff* pior do que o atual.

### 3. Nós do tipo $t_1$ : resposta à primeira oferta

Aceitando a oferta de  $f_1$ , a aeronave  $f_2$  terá utilidade igual a  $-k_2(y_1)$ . Se couber a contra-oferta, a utilidade esperada será  $-\delta^2 k_2(y_2)$ , uma vez que  $f_2$  fará uma oferta aceitável. A estratégia *rej* somente faz sentido se  $\delta$  for suficientemente alto.

### 4. No nó $t_0$ : oferta inicial

A utilidade esperada por  $f_1$  é  $-k_1(x_1)$ , que corresponde exatamente à aceitação da oferta proposta. Para que isto ocorra,  $f_1$  deve elaborar uma oferta aceitável, ou seja, que maximize  $-k_1(x_1)$  sem que a utilidade  $-k_2(y_1)$  seja tão baixa a ponto de estimular  $f_2$  a prosseguir na negociação. Partindo-se da premissa de que a significância das aeronaves é distinta, o custo de 1 minuto de atraso é diferente para as aeronaves. Logo,  $f_1$  fará um esforço para propor

uma oferta que venha a equalizar os custos de ambas. Sob estas condições, a aeronave  $f_2$  é mais propensa a aceitar a oferta.

Perceba que a estratégia *rej* geralmente está associada a um alto valor de  $\delta$ , ou seja, quando a aeronave oponente já está muito próxima ao horário de decolagem. A utilização desta estratégia em qualquer momento do jogo conserva o *status quo* do cenário, todavia sendo extremamente desestimulante no processo de barganha. Assim, por indução retroativa, o único equilíbrio obtido faz com que o jogo termine na primeira rodada. Este equilíbrio é eficiente, uma vez que não há perda com a espera. Conclui-se, portanto, que este subjogo é estrategicamente consistente.

A consistência estratégica de cada jogo entre as aeronaves dois-a-dois tem um efeito ainda mais importante. O jogo de alocação global  $G$  das aeronaves é a junção de cada um destes conjuntos de informação que, por serem consistentes, são sub-jogos próprios de  $G$ . Como cada um destes sub-jogos possui um equilíbrio de Nash obtido por indução retroativa, o perfil estratégico de  $G$  irá constituir um *equilíbrio perfeito em sub-jogos* (EPS). Como  $G$  está na forma extensiva, ainda utilizando-se a indução retroativa, verifica-se que este perfil estratégico é de fato um equilíbrio de Nash do próprio  $G$ . A consequência é que a fila de decolagens produzida após este processo iterativo é ótima, segundo os critérios estabelecidos para a distribuição dos custos de atrasos.

# Capítulo 7

## O Sistema de Gerenciamento Colaborativo de Partidas

Este capítulo descreve o funcionamento e a aplicação do modelo CoDMAN para gerenciamento colaborativo de partidas em aeroportos (*Collaborative Departure Management*).

A seção 7.1 sucintamente apresenta um panorama do sistema CoDMAN e como este modelo aborda o problema apresentado. A seção 7.2 elucida os requisitos de implementação que foram levantados e as estratégias de elicitação utilizadas. A descrição da implementação do protótipo desenvolvido é apresentada na seção 7.3, juntamente com as principais classes e bases de dados utilizadas.

A estruturação do processo de negociação é apresentada na seção 7.4. São descritos os procedimentos de alocação da fila primária, elaboração e avaliação das ofertas que as aeronaves irão propor no processo de interação com os demais agentes. Por fim, a seção 7.5 descreve como são simulados os movimentos de decolagem e aterrissagem das aeronaves, e o seu impacto no cenário.

### 7.1 Descrição do sistema

Ao serem estudados os dados a respeito da utilização da infraestrutura aeroportuária atualmente disponível no Brasil<sup>1</sup>, percebeu-se que é urgente a necessidade da implementação de melhorias no que tange ao gerenciamento do fluxo de passageiros e aeronaves nos aeroportos brasileiros. Tendo isto em mente, a Fundação Ezute, em um esforço conjunto com o Laboratório de Pesquisa em Transporte Aéreo da Universidade de Brasília e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), idealizou o sistema denominado SiGePA (Sistema de Gestão de Partidas em Aeroportos), apoiado pelo FINEP [53].

A modelagem CoDMAN, proposta por meio do presente trabalho, é desenvolvida com o intuito de agregar a sistemas de monitoramento e gerenciamento de partidas a funcionalidade colaborativa ainda não presente nos atuais sistemas utilizados pelos órgãos de controle brasileiros. Para tanto, faz-se necessária a implementação de

---

<sup>1</sup>Mais detalhes podem ser verificados na seção 4.8

um protótipo para fins de validação metodológica. Nesta dissertação, este protótipo validador será denominado simplesmente *Sistema CoDMAN*.

O objetivo da implementação proposta é a disponibilização de uma ferramenta para o acompanhamento em tempo real e apoio à decisão tática sobre a utilização dos recursos em solo (portões de embarque - *gates*, pátios, equipamentos de movimentação) e das pistas de pouso e decolagem nos aeroportos. A partir da integração de informações a respeito do andamento dos voos, situação das aeronaves no solo e condições de operação das pistas de pouso e decolagem, o CoDMAN busca a sequência ótima de operações das aeronaves a cada instante do processamento e sugerirá ações a serem tomadas para a manutenção do fluxo eficiente das decolagens.

Os trabalhos são conduzidos observando-se as seguintes estratégias de desenvolvimento:

- Coleta de dados em campo, por meio de visitas aos órgãos gestores de tráfego aéreo no Brasil (CGNA, CINDACTA I e Torre de controle do Aeroporto de Brasília). São disponibilizados dados inerentes à movimentação das aeronaves dentro do espaço aéreo que é o objetivo da pesquisa;
- Modelagem dos cenários a serem estudados, realizada de acordo com a ocupação prevista dos recursos disponíveis no aeródromo escolhido para a simulação;
- Estudo de caso, onde os conceitos estudados são verificados através da simulação de movimentos de decolagens e aterrissagens, com ajustes manuais dos parâmetros de demanda e capacidade do aeroporto estudado.

## **7.2 Requisitos operacionais**

### **7.2.1 Levantamento de requisitos**

A elicitación de requisitos junto aos usuários é fundamental para a compreensão detalhada do problema e dos resultados esperados com a implantação da metodologia proposta. Esta etapa inicial do desenvolvimento foi realizada com a execução das seguintes tarefas:

- entrevistas com os usuários impactados, que são os controladores da torre de controle do Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR);
- visitas à sala de Serviço de Informação Aeronáutica (AIS) de Brasília;
- reuniões com operadores dos órgãos de controle e gerenciamento;
- visitas e acompanhamento das atividades de monitoramento e controle da terminal Brasília;
- reuniões com engenheiros e analistas da Fundação Ezute.

Naturalmente, a implementação do sistema CoDMAN deverá obedecer a regulamentação vigente estabelecida pelo órgão central de gerenciamento da navegação

aérea brasileira (CGNA), ou seja, o protótipo desenvolvido não poderá considerar como válido nenhum resultado que viole as normas de segurança do tráfego aéreo. Ainda, o CoDMAN contempla exatamente as fases de execução do voo que precedem a decolagem da aeronave, conforme é possível observar na figura 7.1.

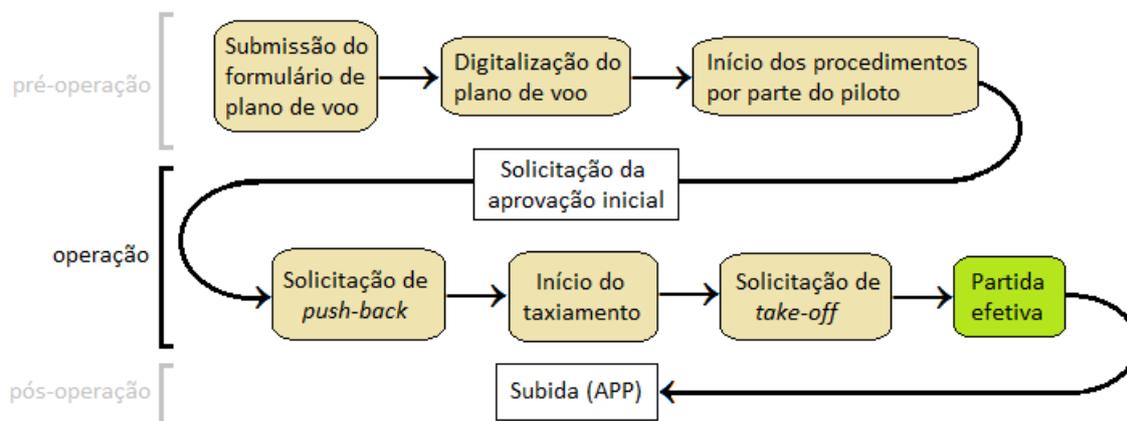


Figura 7.1: Cenário de operação do sistema CoDMAN.

## 7.2.2 Requisitos funcionais

A principal funcionalidade do sistema CoDMAN é elaborar programações de partida em conjunto com as trajetórias a serem seguidas pelas aeronaves dentro do espaço aéreo da área terminal (TMA), oferecendo suporte ao operador de solo para a execução das seguintes atividades:

- uso eficiente das pistas nas operações de decolagem;
- organização do tráfego aéreo da TMA;
- minimização de atrasos introduzidos por retenção em solo.

O sistema deve ser capaz de conhecer os atributos de operação das aeronaves. Isto pressupõe uma interface com os sistemas de obtenção de dados utilizados pelos Centros de Controle de Área e pela torre de controle. De fato, o Sistema de Tratamento e Visualização de Dados (STVD) executa este papel ao prover para o controlador as informações sobre as aeronaves, intenções de voo, informações meteorológicas etc. Para o desenvolvimento do CoDMAN, o acesso a este sistema é simulado por meio de uma base de dados estática que contém os dados a serem tratados, sendo eles:

- *slots* de chegada e partida determinados pelo Gerenciamento de Fluxo para os aeroportos coordenados;
- estado operacional de cada aeronave presente na TMA ou em processo de taxiamento, como posição, velocidade corrente e movimentação;
- planos de voo das aeronaves no pátio do aeródromo;

- posição e estimados de chegada das aeronaves em aproximação.

O sistema CoDMAN deve elaborar as sequências de partida levando em consideração as previsões de chegada e as restrições aeroportuárias, garantindo o correto cumprimento das separações de segurança entre as chegadas e partidas, uma vez que não pode ser ignorada a existência das esteiras de turbulência produzidas pelas aeronaves em movimento. Possuem prioridade na fila de decolagem os voos com *slots* ATFM previamente alocados, na tentativa de se preservar a ordem FIFO (*first in, first out*), estabelecida de maneira ideal na fase pré-tática dos voos.

### 7.2.3 Metas de qualidade

Para que o sistema desenvolvido possa ser validado após a simulação, é necessário estabelecer metas de qualidade.

- Usabilidade: verificar se o sistema favorece a interação com o usuário, provendo mecanismos adequados de entrada e saída;
- Segurança: considerar os requisitos de integridade, disponibilidade, confiabilidade e autenticidade no desenvolvimento do projeto;
- Desempenho: avaliar se o tempo de resposta é adequado e se as tarefas são concluídas em tempo determinístico; mensurar a complexidade computacional dos algoritmos utilizados;
- Escalabilidade: garantir a disponibilidade em caso de expansão; verificar se o protótipo é desenvolvido de modo a facilitar alterações em função de eventuais mudanças de requisitos de negócio;
- Testabilidade: verificar se a complexidade das atividades de definição dos procedimentos de teste é aceitável e se os resultados podem ser apreciados de maneira pragmática e eficiente.

## 7.3 Implementação do protótipo

O sistema foi desenvolvido com o uso da linguagem C++, considerada uma importante linguagem na programação orientada a objetos, fundamental para esta implementação. Para tanto, foi utilizada a IDE (*Integrated Development Environment*) Eclipse Helios - versão de *release* para a tarefa de codificação e o compilador GCC C++ para a geração do arquivo executável. O ambiente de desenvolvimento utiliza as instalações do Laboratório de Pesquisa em Transporte Aéreo da Universidade de Brasília, ou simplesmente TransLab.

As principais classes dentro do protótipo se relacionam conforme a figura 7.2. O *Aeroporto* gerencia diretamente o conjunto (*pool*) das aeronaves que estão em solo, e o *Radar* gerencia o *pool* das aeronaves que estão no ar. As seções seguintes elucidam as funcionalidades e o comportamento das principais classes implementadas.

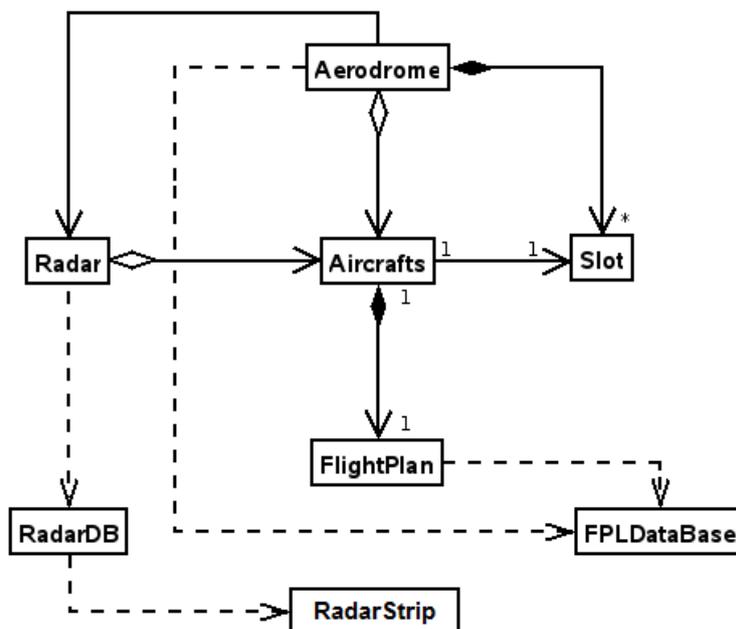


Figura 7.2: Diagrama de classes do sistema CoDMAN.

### 7.3.1 Base de dados

As bases de dados para as simulações contam com valores reais, que são os planos de voo válidos para o mês de fevereiro de 2013, disponibilizados pelo portal on-line do CGNA<sup>2</sup>. O acesso direto a estas informações é implementado por classes específicas, que são *FPLDataBase.cpp* e *RadarDataBase.cpp*. Tais classes se destinam apenas a acessar os arquivos com as informações de planos de voo e pistas<sup>3</sup> de radar, respectivamente, e disponibilizá-las a quem interessar possa. Para fins de desambiguação, as pistas de radar serão doravante chamadas de *strips* de radar.

A classe *FPLDataBase.cpp* pode ser acessada da seguinte maneira:

- método *getFPLByTime(start, end)*: retorna os planos de voo cuja execução está prevista para um momento compreendido entre um horário inicial (*start*) e um horário final (*end*);
- método *getFPLByNumber(num)*: retorna o plano de voo identificado pelo número fornecido (*num*).

Já a classe *RadarDataBase.cpp* pode ser acessada a partir do método *getImpactingFPL()*, que retorna todos os planos de voo que ocupam a TMA. As informações de radar, denominadas *strips*, são construídas a partir destes planos de voo. As *strips* são utilizadas apenas pela classe *Radar.cpp*, que é responsável em alocar uma aeronave para cada *strip* da base de dados e colocá-la em operação. Portanto, o acesso ao cenário da TMA é garantido através da classe *Radar.cpp*.

<sup>2</sup>[http://www.cgna.gov.br/rpl/rpl\\_atual.htm](http://www.cgna.gov.br/rpl/rpl_atual.htm)

<sup>3</sup>Denomina-se *pista* uma aeronave identificada que pode ser visualizada pelo controlador.

### 7.3.2 Classe Aircraft.cpp

Esta classe é construída para representar uma aeronave, ou seja, o agente da negociação é uma instância da classe *Aircraft.cpp*. Por este motivo, uma *aeronave* e um *agente* representam de fato a mesma entidade, para fins de negociação e alocação. As principais responsabilidades deste agente são:

- prover à entidade aeroportuária todas as informações concernentes à execução do voo e ao perfil da aeronave;
- calcular e fornecer os dados sobre o atraso e o custo do mesmo;
- elaborar uma oferta de acordo com o *payoff* esperado, tendo conhecimento completo a respeito de seu oponente, porém sendo adotado um comportamento predominantemente competitivo;
- avaliar as ofertas recebidas, observando as propriedades mínimas de segurança e viabilidade operacional;
- tentar otimizar as ofertas recusadas atuando de maneira cooperativa, para que o passo seguinte no processo interativo tenha o menor custo local possível para o cenário.

### 7.3.3 Classe Aerodrome.cpp

O aeródromo é representado pela classe *Aerodrome.cpp*. Esta é a classe mais complexa do sistema, uma vez que todo o gerenciamento de *slots*, aeronaves e *strips* de radar incide sobre este objeto. As responsabilidades do aeródromo são:

- alocar *slots* para os planos de voo recebidos;
- garantir a separação mínima entre as aeronaves na fila de decolagem;
- instanciar as aeronaves, atribuindo a elas os horários de decolagem correspondentes;
- promover a decolagem das aeronaves, entregando à TMA os voos que alcançam seu horário real de partida;
- receber aeronaves que deixam a TMA com destino ao aeródromo simulado, ou seja, que iniciam o procedimento de aterrissagem;
- alocar as aeronaves do *pool* de voos inativos aos voos a serem executados em um momento posterior do mesmo dia de operação;
- promover a negociação entre os pares de aeronaves;
- executar a validação das ofertas que são entregues no decorrer da negociação;
- efetuar a aplicação das ofertas aceitas, com a consequente atualização da fila de *slots*;
- arbitrar a oferta final, no caso de negociações infrutíferas;
- efetuar e prover os cálculos estatísticos de desempenho do cenário.

## 7.4 Procedimentos de negociação

### 7.4.1 Alocação da fila inicial

No primeiro momento, é estabelecida uma fila inicial de decolagens com base nos planos de voo transmitidos. Na etapa de planejamento estratégico, todos os planos de voo para o dia de análise são observados e para cada um é alocado um *slot* correspondente. Com relação à alocação das filas de decolagem, a diferença entre as etapas de planejamento estratégico, pré-tático e tático consiste apenas no volume de planos de voo analisados simultaneamente. No segundo e terceiro casos, são tratados os planos de voo compreendidos em um intervalo de duas horas a partir de determinado horário, conforme previsto nestas etapas de planejamento. O horário é incrementado a cada ciclo de observação de desempenho do cenário.

Estando pronta a fila inicial de decolagens, a mesma agora sofre uma degradação natural, uma vez que é efetuado o procedimento de garantia de separação entre os voos. Cada *slot* é comparado com os *slots* vizinhos a fim de se identificar a separação mínima necessária, com base no porte das aeronaves envolvidas. Este procedimento introduz atrasos a determinados voos.

Naturalmente, a cada *slot* corresponde uma aeronave. Não tendo previsão de decolagem para as próximas duas horas, a aeronave fica em um estado ocioso. No entanto, esta aeronave pode negociar normalmente o seu *slot*, conforme conveniência. A partir do momento em que uma aeronave recebe um *slot*, é possível calcular o atraso previsto para este agente. Deste modo, a fila de aeronaves no pátio é percorrida e aquelas que apresentarem atrasos recebem a oportunidade de negociar o seu *slot* com a aeronave vizinha. É iniciado então o procedimento de negociação, intermediado pela entidade aeroportuária.

### 7.4.2 Negociação de *slots*

Antes do início da negociação, o aeroporto recupera os gradientes de impaciência do proponente (aeronave que deseja melhorar seu *slot*) e do oponente (aeronave que receberá a oferta de realocação) a fim de calcular o fator de desconto *delta*. O processo de barganha entre as duas aeronaves enfim se inicia, sendo concedidas até três rodadas de negociação, conforme descrito na seção 6.4.

No processo iterativo, a aeronave proponente calcula uma oferta e a transmite à aeronave oponente, que faz a apreciação da oferta recebida. O aeroporto recebe a oferta proposta e o seu resultado, validando ou não a oferta segundo os parâmetros operacionais de segurança. Sendo validada, no caso da oferta não ter sido aceita, o aeroporto a armazena a fim de manter a memória da melhor oferta dentre todas as sugeridas na negociação. Esta decisão é feita com base no custo total para o cenário.

Se a oferta for rejeitada pelo oponente, é acionada uma nova rodada de proposição de ofertas. O fator de desconto é incrementado e as aeronaves trocam seus papéis, onde o oponente da rodada anterior agora será o proponente, e vice-versa.

Se o oponente aceitar a oferta ou manifestar indiferença com relação a ela, o aeroporto imediatamente aplica a ação sugerida. A fila de *slots* é atualizada com

os novos horários de decolagem das aeronaves envolvidas e a consulta prossegue a fim de se detectar outras aeronaves que também desejam negociar.

No caso de nenhum agente aceitar as ofertas propostas, a negociação se encerra sem sucesso. Quando isto acontece, o aeroporto avalia a melhor oferta dentre todas as sugeridas e confronta o custo dos atrasos do cenário atual com o custo do cenário caso a melhor oferta fosse aplicada. Se esta oferta diminui o custo acumulado atual, ela é aplicada, mesmo que a negociação tenha terminado sem que fosse explicitamente identificado um vencedor.

Uma característica importante das ofertas lançadas é que estas afetam exclusivamente as duas aeronaves que participam da negociação, mantendo intactos os demais *slots* da fila. Este mecanismo pode ser entendido com a leitura do algoritmo 1.

---

**Algoritmo 1:** Negociação entre duas aeronaves

---

**Entrada:** *proponente* e *oponente*

```
while oferta não for aceita do
2:   verifica papéis das aeronaves
      proponente elabora nova oferta
4:   if número de ofertas  $\neq$  máximo and oferta é válida then
      proponente calcula e envia oferta ao oponente
6:   if oferta é aceita then
      aplicar ação sugerida
8:   else
      if oponente quer lançar contra-oferta then
10:    atualizar  $\delta$ 
      end if
12:  end if
      end if
14: end while
      /* arbitragem da oferta final */
      if nenhuma oferta foi aceita then
16:  das ofertas sugeridas, aplicar a de menor custo global
      end if
18: return true, se houve inversão de pares; false, caso contrário
```

---

Ao atingir a marca dos dez minutos que antecedem à sua decolagem, a aeronave é permanentemente impedida de participar de qualquer negociação. Não há regulamentação ou recomendação técnica a respeito deste tempo, sendo aqui definido apenas para fins de simulação. A importância da existência desta janela é alterar o estado da movimentação da aeronave, que deixa sua posição de embarque e inicia o taxiamento rumo à cabeceira da pista, onde aguarda autorização para decolagem.

### 7.4.3 Concepção da oferta

A aeronave é responsável por efetuar o cálculo de uma oferta aceitável para o seu oponente. Como este jogo é modelado com informação completa, todo agente tem

acesso às informações inerentes ao seu oponente, sendo então possível elaborar uma oferta que ao mesmo tempo minimize o custo do agente proponente e que ofereça o menor impacto possível ao oponente.

A oferta pode ser classificada em duas categorias:

- é iniciativa do proponente;
- é uma contra-proposta relativa a uma rodada anterior.

Quando a oferta for de iniciativa do proponente da negociação, inicialmente é feito o cálculo do máximo que este pode ganhar sem que o oponente tenha custo algum. A partir deste valor, somente pode haver maior ganho se o oponente sofrer algum tipo de penalização. Assim, o proponente tenta calcular uma oferta que faça seu adversário avançar seu *slot* ao invés de cedê-lo, pois o custo de um adiantamento é menor do que o custo de um atraso. Não sendo possível executar esta tarefa, resta a opção de propor a troca de *slots*, onde no caso é contada uma reversa caso esta ação seja efetivamente aplicada.

Este processo de cálculo da oferta a ser enviada ao oponente é detalhado no algoritmo 2. Entre as linhas 3 e 9, a aeronave verifica qual será a melhor oferta sem que seu oponente tenha qualquer custo, o que equivale à oferta *ret*. A partir da linha 10, a aeronave tenta otimizar esta oferta, já com algum custo ao oponente. Entre as linhas 11 e 18, a proposta é que o oponente avance para um *slot* livre adiante (oferta *advance*), pois este custo é menor. Não sendo possível, somente resta a proposta de troca de *slots*, numa oferta equivalente à ação *swap*.

Se a oferta for uma contra-proposta do oponente, o agente é modelado para assumir um comportamento cooperativo. Na rodada anterior, este agente rejeitou a oferta e sinalizou que é possível propor algo mais interessante, sendo eventualmente possível inclusive melhorar seu próprio desempenho no cenário. A escolha por uma contra-oferta se deve ao fato de que seu adversário tentou minimizar seu custo em detrimento da introdução de custos ao agente em questão. Nesta rodada seguinte, o agente (desta vez como proponente) tentará sugerir uma inversão de papeis, fazendo com que o oponente ocupe um *slot* livre entre o proponente e o voo precedente na fila. São três casos possíveis:

1. *Contra-oferta simples*: o agente pode já ter um custo associado a um atraso positivo (está adiantado). É verificada a possibilidade de um atraso programado a fim de balancear os custos entre os dois agentes;
2. *O custo da proposta é muito alto*: o agente tentará sugerir ao seu oponente um adiantamento superior ao sugerido por este. Desta forma, o custo do atraso do oponente é substituído pelo custo do adiantamento, que é consideravelmente menor;
3. *Cooperação com o oponente*: se o oponente sugeriu um adiantamento, o agente pode sugerir adiantar-se, porém com um valor menor do que o sugerido. Em contrapartida, o oponente adianta-se menos do que o desejado anteriormente, mas o custo associado ao seu atraso é menor do que o atual, o que torna a proposta atraente. Este ato cooperativo do agente proponente lhe causa algum custo, mas o resultado para o cenário é mais satisfatório.

---

**Algoritmo 2:** Cálculo da melhor oferta

---

**Entrada:** *oponente*

**Saída:** resposta do oponente à oferta

```
offerAtrasoProp ← 0
2: diff ← horarioProponente – horarioOponente
   if sepSeguraProponenteOponente < diff then
4:   if atrasoAtualProp < (diff – sepSeguraProponenteOponente) then
       offerAtrasoProp ← atrasoAtualProp
6:   else
       offerAtrasoProp ← diff – sepSeguraProponenteOponente
8:   end if
   end if
10: if offerAtrasoProp ≠ atrasoAtualProp then
    sepOponente ← sepSeguraAntecessorOponente
12:   if distOponAoAntec > tresMinutos then
       sepOponente ← sepOponente – tresMinutos
14:   if distOponAoAntec < (atrasoAtualProp – offerAtrasoProp) then
       offerAtrasoOponente ← distOponAoAntec
16:   else
       offerAtrasoOponente ← atrasoAtualProp – offerAtrasoProp
18:   end if
   else
20:     offerAtrasoOponente ← sepSeguraOponentePrponente
       if atrasoAtualProp < sepSeguraOponentePrponente then
22:         offerAtrasoProp ← offerAtrasoOponente
       else
24:         if atrasoAtualProp < diff then
             offerAtrasoProp ← atrasoAtualProp
26:         else
             offerAtrasoProp ← diff
28:         end if
       end if
30:   end if
   end if
32: offerAtrasoProp ← –offerAtrasoProp
    EnviaOferta()
34: return resposta do oponente à oferta enviada
```

---

O adiantamento do *slot* poderá trazer custos, mas ainda assim o desempenho do oponente seria melhorado. Não sendo possível esta manobra, o agente poderá propor um adiantamento simples de *slot*, diminuindo o custo associado ao atraso do oponente. Quando nenhum tipo de manipulação na fila for possível, a oferta se restringe a manter o *status quo* do cenário, sendo assim transferida ao aeroporto a responsabilidade da escolha da melhor oferta.

#### 7.4.4 Avaliação da oferta

Uma vez que na aceitação são considerados os valores da significância  $\sigma$  para ambos os agentes, tem-se que o custo de um minuto de atraso é distinto para os dois voos. Deseja-se, então, equalizar os custos recuperando o máximo *payoff* possível. As negociações fundamentadas no protocolo de Rubinstein têm uma degradação intrínseca, porém programada, da qualidade dos resultados conforme o tempo evolui. Justamente por este motivo, os agentes foram modelados exatamente para assumir um caráter menos ambicioso caso recusem alguma oferta.

Ao receber uma oferta, a primeira atitude do agente é verificar se esta viola alguma restrição, como por exemplo o atraso ou o adiantamento máximos tolerados para o voo em questão. Sendo uma oferta plausível, o agente calcula uma oferta aceitável pelo seu oponente na rodada seguinte. Neste momento, o agente simplesmente confronta o *payoff* da aceitação da oferta sugerida com o *payoff* da oferta a ser lançada na próxima rodada.

O comportamento cooperativo se deve ao fato de que é necessário também observar o *payoff* do oponente em ambas as etapas iterativas. Se este *payoff* for menor nas rodadas posteriores, a tendência é que o oponente rejeite a oferta e o processo de negociação seja degradado. Portanto, espera-se que seja vantajoso ao agente a aceitação da oferta recebida, a não ser que ele consiga calcular uma nova oferta que balanceie os custos dos dois agentes envolvidos. Esta verificação de *payoffs* garante que o custo global seja minimizado, mesmo que os custos dos atrasos propostos sejam invertidos entre os jogadores.

Quando o agente verifica que não é possível melhorar o *payoff* da negociação na rodada seguinte, ele avalia se a melhor resposta é a aceitação ou a rejeição da oferta. O algoritmo 3 formaliza o processo de cálculo destas alternativas.

Assim, toda oferta possui três resultados possíveis:

1. *A oferta é aceita*: ela é imediatamente aplicada e a fila de *slots* é devidamente atualizada;
2. *A oferta é confrontada*: o agente elabora uma oferta melhor na rodada seguinte, o que desencadeia outro ciclo *propõe - responde*;
3. *A oferta é rejeitada*: a oferta sugerida é inviável para o receptor, que não consegue calcular uma proposta melhor. A aplicação (ou não) de alguma das ofertas propostas é deixada a cargo da entidade aeroportuária.

---

**Algoritmo 3: Decisão pela aceitação da oferta**

---

**Entrada:** *proponente e oferta*

**Saída:** *resposta da aeronave à oferta recebida*

```
    atraso  $\leftarrow$  atrasoAtual + atrasoSugerido
2: if atraso > atrasoMaximo or gradiente = 1 then
    resposta  $\leftarrow$  REJECT
4: else
    custo  $\leftarrow$  CalculaCustoOferta()
6: if atraso == 0 or custo < custoAtual then
    resposta  $\leftarrow$  ACCEPT atraso < 0
8: if atraso < -adiantamentoMaximo then
    resposta  $\leftarrow$  COUNTER atrasoAtual sepSegOpon
10: proxAtraso  $\leftarrow$  distOponAoAntec + sepSegura
    payoff  $\leftarrow$  Payoff(custoAtual, ACCEPT)
12: payoffOpon  $\leftarrow$  PayoffOpon(custoProxAtraso, COUNTER)
    if payoff > payoffOpon then
14: resposta  $\leftarrow$  ACCEPT
    else
16: resposta  $\leftarrow$  COUNTER
    end if
18: else
    resposta  $\leftarrow$  COUNTER
20: end if
else
22: if distOponAoAntec < sepSegura and distAntec  $\leq$  tresMinutos then
    payoff  $\leftarrow$  PayoffTotal(custosOferta, ACCEPT)
24: proximoPayoff  $\leftarrow$  PayoffTotal(custosAtuais, REJECT)
    if payoff  $\geq$  proximoPayoff then
26: resposta  $\leftarrow$  ACCEPT
    else
28: resposta  $\leftarrow$  REJECT
    end if
30: else
    resposta  $\leftarrow$  REJECT
32: end if
end if
34: end if
return resposta
```

---

## 7.5 Movimentação das aeronaves

Todos os voos tratados no sistema são divididos em três categorias, conforme seu impacto para o tráfego aéreo na TMA:

- O voo decola do aeródromo e ingressa na TMA;
- O voo deixa a TMA e aterrissa no aeródromo;
- O voo transita pela TMA sem intenção de aterrissagem no aeródromo.

No desenvolvimento do sistema, o aeródromo é o foco das movimentações das aeronaves. Para tanto, é constante a observação do desempenho das aeronaves em solo e no ar, sendo imprescindível conhecer aquelas que irão impactar a infraestrutura aeroportuária, por conseguinte onerando as atividades operacionais.

Basicamente, o aeroporto se encarrega de receber e despachar aeronaves, priorizando aquelas que irão aterrissar. As informações de radar devem ser constantemente atualizadas e disponibilizadas. A fim de que a entidade aeroportuária atue em conformidade com a TMA, a cada minuto é feita a atualização do estado de movimentação dos voos ativos. Com a fila de decolagens já preparada, o aeroporto primeiramente recebe as aeronaves que pretendem aterrissar.

### 7.5.1 Processo de aterrissagem

O processo de aterrissagem é elucidado no algoritmo 4. Este método recebe como parâmetro o conjunto de todas as aeronaves que estão ativas na instância de radar, ou seja, que estão no ar. Antes da aterrissagem, é verificada a capacidade do aeródromo. Se não for possível mais receber aeronaves naquele instante, é disparada uma mensagem ao radar para que os próximos voos sejam atrasados, ou seja, é aplicada uma medida restritiva do tipo espera em ar (*Airborne Holding*). A avaliação do perfil da aeronave é feita de modo a verificar se a mesma deseja aterrissar e, caso positivo, se o seu horário de chegada já foi atingido. A recepção da aeronave no pátio do aeródromo simplesmente altera o estado de movimentação da aeronave para ocioso e a disponibiliza para utilização por um voo futuro. O radar deixa de administrar as aeronaves que concluíram o voo.

### 7.5.2 Processo de decolagem

O gerenciamento do processo de decolagens ocorre de maneira análoga. A fila de *slots* é percorrida a fim de ver quantas aeronaves podem decolar em um dado horário. Primeiramente, a capacidade aeroportuária de decolagens é verificada. Sendo possível despachar alguma aeronave, o *slot* seguinte é atualizado com relação à distância (em termos de tempo) para o próximo voo. Todas as informações a respeito da aeronave são armazenadas para fins estatísticos. Este processo é detalhado no algoritmo 5.

Se alguma aeronave não conseguir decolar em virtude da capacidade aeroportuária, é aplicada a ela uma medida restritiva do tipo espera em solo (*Ground Holding*). Um minuto de atraso é atribuído, o que força a atualização da fila a fim de

---

**Algoritmo 4:** Monitoramento das aeronaves a aterrissar

---

**Entrada:** container de *aeronaves* no ar

```
AHP ← false
2: for all aeronaves do
    aeronave ← proximaAeronave
4:   if capacidadeAterrissagens ≤ 0 then
    AHP ← true
6:   break
    end if
8:   if statusAeronave = LANDING and horarioAterrissagem = horarioAtual
    then
    receber aeronave no pátio do aeródromo
10:  end if
    end for
12: if AHP = true then
    notificar Radar
14: end if
    return número de aterrissagens
```

---

---

**Algoritmo 5:** Despacho de aeronaves para a TMA

---

**Entrada:** container de *slots* alocados para decolagem

```
GHP ← false
2: for all slots do
    slot ← proximoSlot
4:   aeronave ← ocupanteSlot
    if capacidadeDecolagens = 0 then
6:     GHP ← true
    break
8:   end if
    if statusAeronave = DEPARTING and horarioDecolagem = horarioAtual
    then
10:    entregar aeronave ao Radar
    liberar recursos da aeronave no aeródromo
12:    atualizar distância do próximo slot
    end if
14:  end for
    if GHP = true then
16:    horarioDecolagem ← horarioDecolagem + umMinuto
    garantir separação mínima na fila de slots
18:    disparar otimização dinâmica da fila de slots
    end if
20:  return fila de slots atualizada
```

---

que a separação de segurança para as decolagens seja garantida. Quando este procedimento é concluído, novamente é feita a otimização da fila, conforme as regras para a negociação entre as aeronaves. Encerrada a atuação do aeroporto nesta etapa, a informação radar é atualizada para a próxima época, ou seja, o mesmo monitoramento é feito para o minuto seguinte dentro do mesmo dia na simulação.

# Capítulo 8

## Simulações e resultados

O estudo de casos é baseado em uma análise dos resultados produzidos pelas simulações do sequenciamento de decolagens feito de maneira colaborativa por parte do CoDMAN. As simulações são elaboradas a fim de se detectar os principais fatores de influência na negociação entre as aeronaves. Para tanto, são concebidos seis cenários de simulação, considerando variações nos perfis do ambiente e dos agentes nele inseridos.

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a utilização do CoDMAN para o sequenciamento de partidas de aeronaves. A seção 8.1 descreve o cenário básico para os agentes, que nesta modelagem, são as aeronaves a impactar a estrutura aeroportuária e o gerenciamento a nível TWR e APP. A seção 8.2 detalha os casos de uso e expõe os resultados obtidos em cada situação simulada.

### 8.1 Descrição do cenário

O cenário utilizado nas simulações é o Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, em Brasília-DF. Este é o terceiro maior aeródromo do Brasil, movimentando cerca de 46 mil passageiros por dia, distribuídos em uma média de 267 pousos e 266 decolagens<sup>1</sup>.

- Nome ICAO: SBBR;
- Nome IATA: BSB;
- Área total: 28.995.153,00  $m^2$
- Capacidade anual: 11 milhões PAX
- Estacionamento de Aeronaves: 40 posições

Ao serem verificadas as informações básicas do aeroporto, percebe-se que este fluxo de passageiros supera em cerca de 50% a capacidade anual atual. O Aeroporto JK conta com a infraestrutura descrita pela tabela 8.1.

Por esta tabela, tem-se que o aeroporto conta com o total de 40 posições destinadas ao manejo das aeronaves em solo e, pela figura 8.1, verifica-se que o aeródromo

---

<sup>1</sup>Fonte: Inframérica (<http://www.bsb.aero/projeto>, acessado em 05/01/2013).

Tabela 8.1: Infraestrutura do sítio aeroportuário do Aeroporto Internacional JK, em Brasília-DF.

Pátio das Aeronaves	Área ( $m^2$ )	Posições	Fingers
Pátio 1	55.479	14	13
Pátio Remoto Principal	20.235	08	-
Pátio 4	27.777	06	-
Pátio 5	37.170	07	-
Pátio 6	38.138	05	-
Pista	Comprimento	Largura	Material
11L/29R	3.200 m	45 m	asfalto
11R/29L	3.300 m	45 m	asfalto

possui duas *runways* operacionais em sua área construída. Como elas estão dispostas com uma separação de 1500 metros, é possível que ambas sejam utilizadas simultaneamente, sabendo-se que a separação mínima entre pistas paralelas deve ser de ao menos 760 metros para que isto ocorra [54]. A disposição das pistas de decolagem e aterrissagem do aeroporto SBBR podem ser visualizadas na figura 8.1.

Todos os voos a serem ordenados partem do Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR). No entanto, o Aeroporto Santa Genoveva, em Goiânia (SBGO), também recebe e despacha voos de/para a TMA Brasília, devido à proximidade entre os dois aeródromos. É possível identificar esta TMA na configuração do espaço aéreo da Região de Informação de Voo de Brasília (FIR-BS), conforme a figura 8.2. Estão destacados os aeroportos SBBR e SBGO, ou seja, Brasília/DF e Goiânia/GO. Por este motivo, todos os planos de voo que possuem como origem ou destino os aeroportos SBBR e SBGO são incluídos no modelo.

## 8.2 Planejamento da simulação

As simulações consistem em avaliar a pertinência do modelo tanto na etapa de planejamento estratégico como nas etapas de planejamento pré-tático e tático. São escolhidas situações onde a demanda de utilização é variada, com base em dados reais de planos de voo. Os casos de simulação são distribuídos em quatro conjuntos:

1. *etapa estratégica*, no caso de simulação 1: não há comunicação com meios de radar;
2. *etapas pré-tática e tática*, no caso de simulação 2: integração entre os dados de planos de voo e informações instantâneas de desempenho;

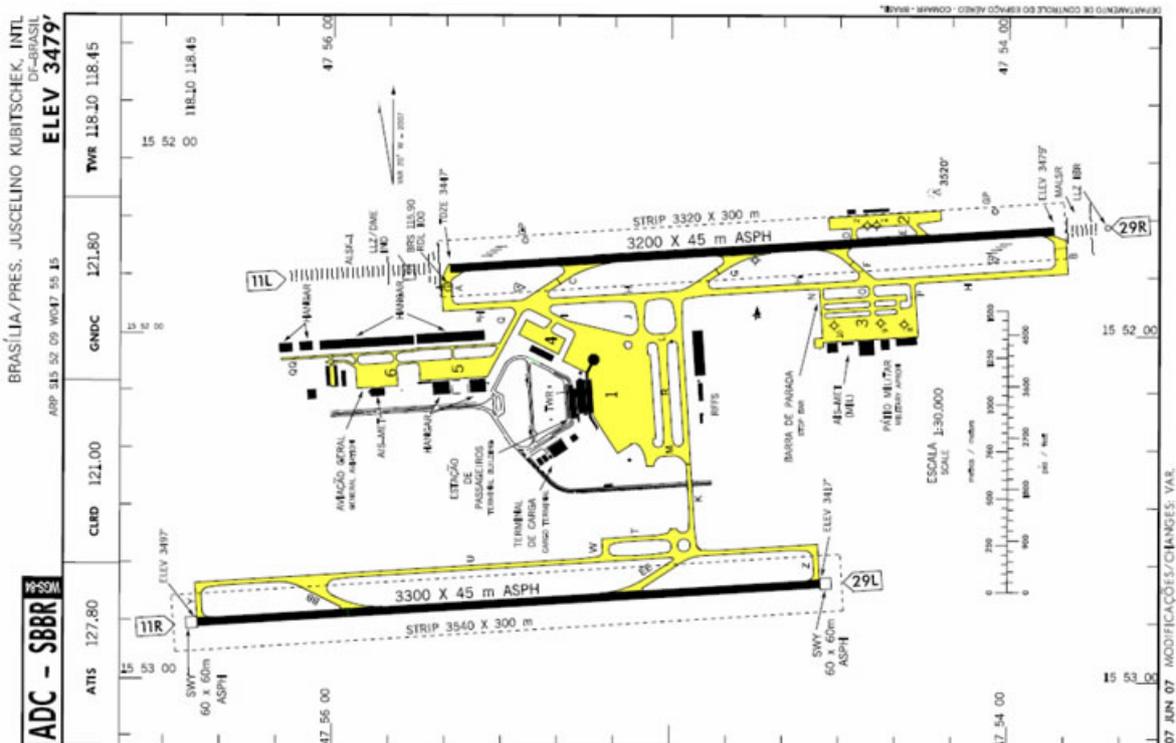


Figura 8.1: Carta do Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR).

3. *infraestrutura aeroportuária*, nos casos de simulação 3 e 4: avaliação da qualidade do sequenciamento com relação aos recursos disponíveis;
4. *sensibilidade a parâmetros*, nos casos de simulação 5 e 6: avaliação do modo como o perfil da aeronave afeta a negociação, ao invés de se avaliar meramente a configuração do cenário.

## 8.2.1 Caso 1: alocação estratégica

O primeiro caso de simulação, para fins de validação do modelo, é feito de modo a ordenar as decolagens de maneira estática, isto é, os voos são considerados dentro da etapa de planejamento estratégico. Os planos de voo das aeronaves são colocados em uma base de dados, de onde é possível recuperar as informações pertinentes.

Para a alocação das aeronaves na ordem FIFO, os planos de voo são ordenados por horário EOBT. De fato, esta configuração primordial da fila é a base inclusive para as demais configurações. No entanto, como a alocação é estratégica neste cenário de simulação, não há inserção de dados em tempo real.

A fila primordial de decolagens é então ajustada a fim de garantir a separação mínima entre as aeronaves. Esta operação introduz alguns atrasos antes mesmo que as aeronaves sofram com medidas restritivas, o que faz com que algumas aeronaves demonstrem interesse em ser alocadas em *slots* mais interessantes. A fila é então percorrida e tais aeronaves são identificadas. É feita a tentativa de negociação com o vizinho à frente, que decolará primeiro, na tentativa de ajuste de horário de decolagem.

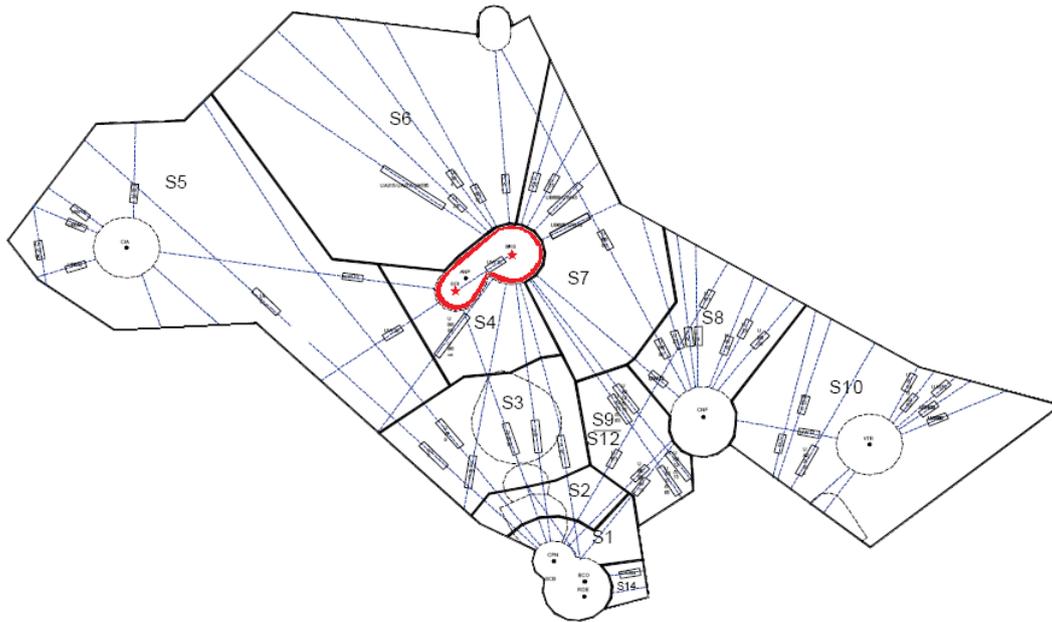


Figura 8.2: Detalhamento da Região de Informação de Voo de Brasília (FIR-BS), com destaque para a TMA Brasília.

No total, foram analisados os planos de voo de 202 aeronaves que decolam do aeródromo SBBR. O desempenho antes da negociação pode ser visualizado na tabela 8.2.

Ao ser acionado o processo de negociação de horário de decolagem entre as aeronaves, foi constatado que a fila otimizada de decolagens agora apresentava 36 aeronaves a decolar fora do horário previsto no plano de voo. No entanto, o fato de um voo estar *fora do horário* não significa exatamente que ele esteja atrasado. Existe a possibilidade de que este voo esteja adiantado, o que lhe atribui um custo, mesmo que inferior ao custo de um atraso. O atraso total da fila, que antes era de 73 minutos, caiu para 61 minutos, ao passo que o custo médio por aeronave atrasada diminuiu em 19%. O principal efeito destas negociações incide sobre o custo total do cenário, que caiu cerca de 17%, conforme demonstra a tabela 8.3.

Vale salientar que tanto o desvio-padrão dos atrasos quanto o desvio-padrão dos custos diminuiu. Esta discrepância se deve ao fato de que os horários de partida foram de fato distribuídos de maneira justa entre as aeronaves, sobretudo em termos de custo associado, ao invés de minutos de atraso.

### 8.2.2 Caso 2: alocação dinâmica

Os casos de simulação no planejamento tático consideram a situação onde há demandas por aterrissagens. O procedimento de aplicação de separação mínima entre as aeronaves é intensificado, uma vez que será eventualmente necessário introduzir atrasos não planejados na fila quando for necessária a aplicação de medida restritiva para espera em solo. Ou seja, o GHP (*Ground Holding Problem*) passa a ser uma preocupação.

Tabela 8.2: Desempenho da fila primordial de decolagens em alocação estática.

Atributo	Resultado
Voos fora do horário	35
Atraso médio por aeronave atrasada	2.09 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	17.779
Atraso total	73 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	0.92133
Desvio-padrão dos custos de atraso	8.10712
Custo total dos atrasos para o cenário	622.267

Nesta simulação, o problema de espera em solo é introduzido em virtude de dois fatores:

1. Elevada demanda por aterrissagens;
2. Horários de decolagem conflitantes entre duas ou mais aeronaves, quando da necessidade de ajuste no horário de partida.

O primeiro fator possui influência direta na capacidade do aeródromo, uma vez que devem ser respeitadas as limitações quanto à utilização das pistas de aterrissagem e decolagem pelas aeronaves. Quando a capacidade de decolagens chega a zero, ou seja, quando não é possível despachar para a TMA nenhuma aeronave em um dado instante  $t$ , é necessário aplicar o atraso de segurança para a próxima aeronave da fila, se esta estiver agendada para decolar no instante  $t$ .

Ao atrasar a primeira aeronave da fila de decolagens, que já estava pronta para a execução do voo, deve ser novamente aplicado o procedimento para a separação mínima de segurança para as aeronaves subsequentes. Assim, todas as aeronaves da fila de decolagens que estiverem à frente do primeiro *slot* livre sofrerão atraso e tal *slot* será ocupado. Este procedimento impede que haja conflito nos horários calculados para partida (os CTOT). Neste procedimento, deseja-se novamente distribuir de maneira justa o custo dos atrasos imprevistos.

Para este caso de simulação, foram analisados 518 voos que impactaram a TMA Brasília, sendo que 85 deles não participaram da movimentação do aeródromo SBBR, ou seja, apenas impactaram a TMA. Dos restantes, 202 decolaram do aeroporto e 231 aterrissaram. Como se esperava, a demanda por aterrissagens degradou o desempenho da fila, fazendo com que 43 voos decolassem fora do horário previsto. O atraso total do cenário foi de 86 minutos. Este aumento se deve ao fato de que foi necessário aplicar a medida restritiva de espera em solo a 7 aeronaves.

A tabela 8.4 detalha os dados da simulação. A quantidade de voos fora do horário aumentou de 43 para 45, porém havendo uma diminuição do atraso total do

Tabela 8.3: Desempenho da fila de decolagens em alocação estática após procedimento de negociação.

Atributo	Resultado
Voos fora do horário	36
Atraso médio por aeronave atrasada	1.69 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	14.3916
Atraso total	61 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	0.915807
Desvio-padrão dos custos de atraso	7.26957
Custo total dos atrasos para o cenário	518.097

cenário, que caiu de 86 minutos para 73 minutos, sendo então minimizado o atraso médio das aeronaves. A redução de cerca de 8.94 para 7.08 no desvio-padrão do custo dos atrasos demonstra que os custos de tais atrasos foram distribuídos de modo a uniformizar o desempenho das aeronaves. Por fim, o custo total do cenário foi diminuído em cerca de 19,5%, o que comprova a melhora na qualidade da sequência de decolagens.

### 8.2.3 Caso 3: redução de *runways*

O terceiro caso de simulação considera o impacto na infraestrutura aeroportuária ao se reduzir o número de pistas de decolagem e aterrissagem. O objetivo aqui é precisamente avaliar a influência da infraestrutura na eficiência das operações de decolagem.

Os planos de voo e as informações de radar permanecem inalterados, o que aumenta a razão *demanda/recursos*. Devido à escassez dos recursos aeroportuários, espera-se uma degradação do modelo frente ao cenário padrão, discutido na Alocação Dinâmica simples do caso 2.

O aeroporto de Brasília conta com duas pistas destinadas aos movimentos de decolagem e aterrissagem, que é uma situação incomum entre os aeroportos brasileiros. De fato, a maioria dos aeroportos coordenados brasileiros somente conta com uma *runway*. Logo, a remoção de uma *runway* reflete a realidade enfrentada atualmente no Brasil.

Foi elaborada nova simulação, considerando que o aeródromo possui apenas uma *runway*. A tabela 8.5 demonstra que a degradação do cenário é nitidamente perceptível. A primeira consequência é o aumento da aplicação das medidas restritivas, devido ao fato de que a infraestrutura aeroportuária rapidamente atinge sua capacidade máxima de operação. É interessante identificar que um dos voos com execução prevista não conseguiu decolar dentro do mesmo dia.

Tabela 8.4: Desempenho das aeronaves com alocação dinâmica de horário de partida.

Atributo	Sem negociação	Com negociação
Número de decolagens	202	202
Número de aterrissagens	231	231
Medidas <i>Ground Holding</i>	7	6
Medidas <i>Airborne Holding</i>	2	2
Voos fora do horário	43	45
Atraso médio por aeronave atrasada	2 minutos	1.62 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	17.0643	13.1282
Atraso total	86 minutos	73 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	0.980878	0.947946
Desvio-padrão dos custos de atraso	8.93824	7.07508
Custo total dos atrasos para o cenário	733.767	590.77

A otimização da situação do aeródromo pode ser analisada na tabela 8.6. Desta vez, um número maior de aeronaves deseja negociar, o que torna o processo de barganha menos cooperativo. Por conseguinte, as otimizações foram mais modestas neste caso de simulação, com o custo total do cenário diminuído em apenas 5.1%. Outra conclusão interessante é o fato de que a remoção de uma pista de pousos ou decolagens aumenta em média 57% o custo do atraso individual das aeronaves, mas eleva em quase quatro vezes o custo do desempenho do cenário.

A modesta diminuição do atraso total se deve ao fato de que foram aplicadas 68 medidas restritivas de espera em solo, tornando a fila de decolagens mais compacta, ou seja, com menor separação entre as decolagens. Isto degrada a qualidade das ofertas sugeridas aos voos vizinhos na fila. A conclusão imediata é que esta demanda por decolagens não é adequada para um aeroporto que apresente tal infraestrutura. De modo geral, esta é a atual conjuntura do cenário brasileiro.

#### 8.2.4 Caso 4: inclusão de *runways*

O quarto caso de simulação considera o impacto na infraestrutura aeroportuária ao se ampliar o número de pistas de decolagem e aterrissagem. Espera-se que haja melhora significativa no desempenho, uma vez que o aumento da capacidade, em tese, diminui a quantidade de medidas restritivas aplicadas, bem como aumenta a quantidade de voos que pode ser movimentados simultaneamente.

Tabela 8.5: Estatísticas de movimentação no aeródromo após a remoção de uma *runway*.

Impacto	Valor
Número de decolagens	201
Número de aterrissagens	229
Total de voos processados	515
Medidas <i>Ground Holding</i>	68
Medidas <i>Airborne Holding</i>	32
Voos atrasados	102

Tabela 8.6: Avaliação da degradação do modelo quando uma *runway* é removida.

Atributo	Sem negociação	Com negociação
Atraso médio por aeronave atrasada	3.23 minutos	3.1 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	26.8013	25.1784
Atraso total	329 minutos	319 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	2.34359	2.39241
Desvio-padrão dos custos de atraso	20.1882	19.4701
Custo total dos atrasos para o cenário	2733.73	2593.38

Para a simulação, foi virtualmente adicionada uma nova pista de rolagem ao aeroporto, que agora contém três *runways* por onde é possível despachar e receber novas aeronaves. Assim como no caso da redução da capacidade, o aumento da capacidade também causa um impacto bastante sensível ao desempenho do cenário. No entanto, ao contrário do caso anterior, este impacto é positivo. A tabela 8.7 resume a movimentação das aeronaves nesta situação.

Ao aeroporto, foi possível receber 231 aeronaves, enquanto que 229 aeronaves aterrissaram quando havia apenas uma pista. Não houve a necessidade de aplicação de medidas restritivas em momento algum e o atraso médio, bem como o seu custo associado, foram minimizados. O desvio-padrão destes custos também caiu, mostrando que a fila está mais equilibrada. Por fim, o custo do cenário caiu em cerca de 23%, conforme apresenta a tabela 8.8.

Tabela 8.7: Estatísticas de movimentação no aeródromo após a adição de uma *runway*.

Impacto	Valor
Número de decolagens	202
Número de aterrissagens	231
Total de voos processados	518
Medidas <i>Ground Holding</i>	0
Medidas <i>Airborne Holding</i>	0
Voos fora do horário	35

Tabela 8.8: Otimização do modelo quando uma *runway* é adicionada.

Atributo	Sem negociação	Com negociação
Atraso médio por aeronave atrasada	2.09 minutos	1.74 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	17.2876	13.3734
Atraso total	73 minutos	61 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	0.932068	0.968609
Desvio-padrão dos custos de atraso	8.0251	6.64978
Custo total dos atrasos para o cenário	605.067	468.07

### 8.2.5 Caso 5: sensibilidade ao volume de passageiros

Um atributo de fundamental importância para a qualidade das negociações em qualquer caso de interação entre os agentes é o fator de significância  $\sigma$ . A significância de uma aeronave para o cenário é diretamente proporcional à sua ocupação, pelo fato de que mais usuários são afetados pelos atrasos eventuais. No entanto, neste caso de simulação, considera-se a quantidade idêntica de 50 passageiros por aeronave. Com isto, os únicos atributos que afetam a significância da aeronave são relacionados ao seu desempenho mecânico.

Considerando a infraestrutura aeroportuária padrão, isto é, contando com a existência das duas *runways* do aeródromo SBBR, observa-se pela tabela 8.9 que o desempenho é essencialmente semelhante ao caso de simulação 2, que modela um dia normal de operação, salvo o custo total do cenário, comparável ao custo de um aeródromo com capacidade aumentada. No entanto, é possível verificar que a diversidade do número de passageiros agrega custo ao cenário, uma vez que as

Tabela 8.9: Desempenho do cenário ao se equalizar o número de passageiros por aeronave.

Atributo	Sem negociação	Com negociação
Voos fora do horário	43	45
Atraso médio por aeronave atrasada	2 minutos	1.62 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	12.8953	10.3201
Atraso total	86 minutos	73 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	0.980878	0.947946
Desvio-padrão dos custos de atraso	6.8192	5.49119
Custo total dos atrasos para o cenário	554.5	464.403

aeronaves com maior ocupação são prioritárias nas negociações. Conclui-se que, quanto mais heterogênea a distribuição de passageiros por aeronave, mais caro será o minuto de atraso para o cenário. Neste caso, os custos totais foram diminuídos em 16,2%.

### 8.2.6 Caso 6: sensibilidade ao fator de carga da companhia aérea

Naturalmente, as companhias aéreas colocam em circulação quantidades diferentes de aeronaves, sendo comum observar nos aeroportos a predominância de determinadas empresas nas posições de embarque de passageiros. Este volume de aeronaves por companhia foi tratado no modelo por meio do fator de carga  $\phi$ , que mensura o impacto operacional específico da linha aérea no aeródromo. A tabela 8.10 apresenta todas as linhas aéreas que impactaram a simulação.

Tabela 8.10: Discriminação da quantidade de aeronaves com planos de voo repetitivos por companhias aéreas.

Companhia aérea	Qtde.	Companhia aérea	Qtde.
Azul	13	TAM	78
Gol	71	Trip	5
OceanAir	24	Webjet	6
Passaredo	3	Outras	2

No cenário padrão, foi utilizado o fator de carga das companhias a fim de ser obtida uma estimativa do custo individual da aeronave. Deste modo, as aeronaves pertencentes às companhias aéreas mais influentes são mais custosas para o cenário. No último caso de simulação, este fator de carga deixa de ser considerado, o que faz o sistema tratar de maneira imparcial as companhias aéreas. Considera-se que todas as companhias aéreas exercem um fator de carga máximo. Como mostra a tabela 8.11, a redução do custo do cenário foi de 19,6%.

Tabela 8.11: Resultados da simulação sem a influência do fator de carga nas negociações.

Atributo	Sem negociação	Com negociação
Voos fora do horário	45	44
Atraso médio por aeronave atrasada	2 minutos	1.66 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	15.7605	12.3761
Atraso total	86 minutos	73 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	0.980878	1.00896
Desvio-padrão dos custos de atraso	7.89842	6.9682
Custo total dos atrasos para o cenário	677.7	544.55

# Capítulo 9

## Considerações finais

Esta dissertação descreve o desenvolvimento do modelo CoDMAN, que utiliza os conceitos de CDM e Teoria dos Jogos para o sequenciamento de partidas de aeronaves em aeródromos controlados. O CoDMAN é um protótipo implementado com fins acadêmicos para a validação metodológica da modelagem proposta. A avaliação e as considerações finais a respeito da pesquisa desenvolvida são encontradas neste capítulo, sendo apresentadas na seção 9.1 as conclusões a respeito dos resultados obtidos.

A seção 9.2 elabora a apreciação da pesquisa desenvolvida, em termos dos objetivos alcançados e da satisfatibilidade dos resultados. Por fim, a seção 9.3 aborda os eventuais trabalhos futuros e novas perspectivas de aplicação.

### 9.1 Avaliação dos resultados

Após as simulações, foi possível compilar os resultados obtidos, expostos de maneira resumida na tabela 9.1. Nesta tabela, são confrontados os valores do custo total e do seu desvio-padrão correspondente para as alocações de horário de decolagem antes e após os procedimentos de negociação segundo o Protocolo de Rubinstein adaptado.

Quando é feito o sequenciamento estático da fila de decolagens, não há interferência de fatores externos ao aeroporto, tampouco existe a preocupação com a capacidade instantânea do aeródromo. Esta exigência é atendida pelas simulações dinâmicas, que apresentam a redução de custo mais significativa para o sequenciamento dinâmico simples. Ainda assim, a diminuição de 17% nos custos do sequenciamento estático evidenciam os benefícios de um planejamento estratégico adequado.

Ao ser observado o cenário padrão, com alocação dinâmica simples, a otimização dos custos foi de 19,5%. O desvio-padrão dos custos foi o que sofreu a maior redução, demonstrando que esta alocação é a que melhor distribui os custos dos atrasos pelas aeronaves.

Ao ser reduzida a capacidade nominal do aeródromo, o protocolo de negociação perde sua eficiência. A causa disto é a perda da manuseabilidade da fila em virtude da diminuição de *slots* livres conforme o tempo evolui. Por este motivo, a quantidade de ofertas que sugerem a troca de posições na fila (*swap*) é aumentada,

Tabela 9.1: Comparação do desempenho dos resultados obtidos para a diminuição do custo total do cenário.

Cenário	Resultados com alocação padrão	Resultados após ofertas alternadas	Otimização
Sequenciamento estático	622.267	518.097	17,0%
	8.10712	7.26957	-0,83755
Sequenciamento dinâmico	733.767	590.77	19,5%
	8.93824	7.07508	-1,86316
Capacidade reduzida	2733.73	2593.38	5,1%
	20.1882	19.4701	-0,7181
Capacidade ampliada	605.067	472.063	23,0%
	8.0251	6.64978	-1,37532
Equalização PAX	554.5	464.403	16,2%
	6.8192	5.49119	-1,32801
Fator de carga uniforme	677.7	544.55	19,6%
	7.89842	6.9682	-0,93022

ocorrendo portanto um maior índice de rejeições por parte das aeronaves oponentes.

Quando a capacidade do aeródromo é ampliada, o custo total dos atrasos naturalmente diminui. Conforme o esperado, neste caso o cenário obteve o melhor resultado no que tange ao custo total dos atrasos, com uma redução de 23%. Isto se deve ao fato de que os atrasos efetivamente diminuem, mesmo que o minuto de atraso não tenha seu custo diminuído. Apesar de ser uma boa solução, ela não é realista, pois existe a premissa de que a demanda não será alterada no caso de investimentos na infraestrutura aeroportuária.

Na equalização da quantidade de passageiros, o cenário apresentou o menor custo total, mas não é a melhor distribuição dos custos. Ao ser considerado o problema da equidade [50], esta solução não é a mais interessante. No entanto, o perfil dos passageiros (faixa etária ou classe dos bilhetes adquiridos) é desprezado nesta simulação, o que poderia ser interessante considerar em um trabalho futuro.

Já na equalização do fator de carga, o custo do cenário foi diminuído em 19,6%. Mas esta distribuição de custos não é justa, sendo de fato a segunda pior situação quanto à distribuição dos custos no cenário dinâmico. Ainda, o custo operacional aumentou frente ao cenário padrão, sugerindo que este custo é sensível às fatias de mercado ocupadas pelas companhias aéreas.

## 9.2 Avaliação da pesquisa

### 9.2.1 Síntese dos objetivos alcançados

Os objetivos propostos foram alcançados. Foi possível simular situações de condições favoráveis e adversas na movimentação de aeronaves no Aeroporto Internacional de Brasília e avaliar o desempenho do modelo proposto em cada cenário de execução planejado. Foi elaborado um estudo de caso com seis cenários de simulação distintos, com variações referentes à etapa de planejamento ATFM, à capacidade aeroportuária e ao perfil das aeronaves. Os resultados obtidos demonstram a consistência e aplicabilidade da solução apresentada.

A disciplina de Teoria dos Jogos foi adequadamente compreendida, sendo possível inclusive utilizá-la para implementar metodologias já consagradas pela comunidade científica, como o *Ration by Schedule* e o *Compression*. Foi demonstrado que um cenário modelado segundo os princípios do CDM de fato se comporta como um jogo cooperativo de informação completa.

A coordenação das informações com os colaboradores da Força Aérea do Brasil foi fundamental. Foram realizadas visitas à torre de controle do aeródromo SBBR, ao DTCEA-BR e à sala AIS, bem como foram realizadas entrevistas com os controladores a fim de que suas reais necessidades fossem identificadas.

### 9.2.2 Inovação e contribuição social

Esta solução aborda de maneira inovadora o problema da alocação de *slots* para decolagens. Após extensa pesquisa do estado da arte, não foi encontrada nenhuma proposta que utilize a Teoria dos Jogos para o sequenciamento de partidas ou para a alocação de *slots* de decolagem. Esta tarefa de sequenciamento de partidas foi adequadamente modelada segundo o Protocolo de Rubinstein para ofertas alternadas entre dois agentes.

Foi implementada uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão por parte do agente humano em um ambiente complexo. Este agente é o controlador de tráfego aéreo, que atualmente somente dispõe de meios de visualização de dados. A expectativa é de que esta implementação diminua a carga de trabalho do agente humano no processo de sequenciamento de partidas, desta forma aumentando a segurança e eficiência operacionais a nível de torre de controle dos aeródromos do Brasil. A contribuição social da pesquisa mostra-se bastante interessante.

Através do protótipo implementado, foi possível estabelecer um nível de comunicação primordial entre as aeronaves, as companhias aéreas e os controladores do aeródromo a fim de que fossem minimizados e equilibrados os custos associados aos atrasos no ambiente aeroportuário. O compartilhamento de informações proporcionado por esta comunicação simula adequadamente o processo de atividades do CDM.

### 9.2.3 Dificuldades enfrentadas

Um fator limitante nas simulações foi a dificuldade em se obter dados precisos da movimentação aérea. O acesso a este tipo de dados é gerenciado pela Força Aérea Brasileira, que atualmente não disponibiliza um banco de informações a nível público. Esta carência foi em partes atendida por meio do contato pessoal com os funcionários dos órgãos de gerenciamento em reuniões e visitas realizadas durante o desenvolvimento da pesquisa.

O sucesso do CoDMAN depende da aplicação da filosofia CDM no escopo do ATFM, estando inclusive limitado a certas restrições legais ainda vigentes. Atualmente, a alocação dos *slots* de partidas é definida exclusivamente pelo CGNA durante a etapa de planejamento estratégico do tráfego aéreo, o que caracteriza como medidas contingenciais quaisquer alterações nas filas de decolagens.

## 9.3 Trabalhos futuros

Esta dissertação apresenta uma proposta inicial para o desenvolvimento de um sistema que tem a finalidade de estabelecer de maneira eficiente o sequenciamento de partidas em aeroportos. Esta implementação tem, inclusive, o potencial de ser parte integrante do sistema SiGePA [53], a ser desenvolvido pela Fundação Ezute, com apoio da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), e implantado nos aeroportos coordenados brasileiros nos próximos anos.

O estudo ainda se encontra na fase de pesquisa, desejando-se a integração futura com sistemas AMAN (*Arrival Management*) que eventualmente sejam desenvolvidos. Espera-se também que seja implementada a interface gráfica do modelo, a fim de que o acesso às informações disponibilizadas pelo CoDMAN seja humanizado.

Apesar de fornecer soluções calculadas como ótimas, espera-se que o sistema não atue de maneira independente da experiência do controlador, que decidirá se a solução apresentada será aplicada ou não, sendo possível efetuar alterações no sequenciamento sugerido. Isto deverá ser feito para que sejam respeitadas as premissas do sistema SiGePA, que garantem que ao controlador será inclusive permitido editar os parâmetros operacionais de sequenciamento, como por exemplo a frequência de planejamento, o tempo de separação, capacidades de pouso e decolagem e reposicionamento das aeronaves na fila, ou até mesmo o congelamento de determinados voos.

A utilização do CDM no Brasil ainda está aquém daquela proposta no caso ideal. Com a efetiva implantação deste processo colaborativo, espera-se que o acesso completo às informações pertinentes às companhias aéreas e aos dados instantâneos de movimentação venham a integrar adequadamente todos os parceiros envolvidos em cada fase de planejamento e operação.

# Referências

- [1] A. M. F. Crespo, C. V. Aquino, B. B. Souza, L. Weingang, A. C. M. A. Melo, and D. P. Alves. Sistema distribuído de apoio à decisão aplicado ao gerenciamento tático do fluxo de tráfego: Caso cindacta i. *VI Simpósio de Transporte Aéreo, Universidade de Maringá - PR*, 1, 2007. 1, 4, 29, 42
- [2] V. F. Ribeiro and W. R. J. Ribeiro. Previsão de cenário para o controle de tráfego aéreo do cindacta i, 07 2008. Trabalho de graduação, Universidade de Brasília - UnB, Brasília - DF. 1, 24, 30
- [3] B. B. Souza. Metodologia de balanceamento inteligente sobre multi-fluxos para aplicação em gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. Master's thesis, Universidade de Brasília - Departamento de Ciência da Computação, 2008. 1, 5
- [4] A. M. F. Crespo. Módulo de avaliação e apoio à decisão: uma aplicação de aprendizagem por reforço no gerenciamento tático do fluxo de tráfego aéreo. Master's thesis, Universidade de Brasília - Departamento de Ciência da Computação, 2010. 1, 5, 19, 20, 27
- [5] C. R. F. Almeida, A. F. Leite, L. Weingang, A. C. M. A. Melo, A. M. F. Crespo, and A. P. Timoszczuk. Network flow algorithms applied to air traffic management. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, 4, 2008. 1
- [6] Comando da Aeronáutica. *Demanda Detalhada dos Aeroportos Brasileiros*, volume 1. Instituto de Aviação Civil, 2005. 1
- [7] A. C. Arruda Jr. Aprendizagem por reforço aplicada à análise de impacto no controle de fluxo de tráfego aéreo. Master's thesis, Universidade de Brasília - Departamento de Ciência da Computação, 2009. 2, 20, 28, 29
- [8] L. Weingang, B.B. Souza, A.M.F. Crespo, and D.P. Alves. Decision support system in tactical air traffic flow management for air traffic flow controllers. *Journal of Air Transport Management*, 14(6):329 – 336, 2008. 2
- [9] A. M. G. Silva. Sistema de simulação acelerado para análise de fluxo de tráfego aéreo. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2001. 4
- [10] V. Ribeiro, W. Ribeiro, L. Weingang, A. C. Arruda Jr., A. M. F. Crespo, and A. P. Timoszczuk. Previsão de cenário para o controle de tráfego aéreo do cindacta

- i. *VII Simpósio de Transporte Aéreo da SBTA, Rio de Janeiro, RJ*, 1, 2008. 4, 58
- [11] M. O. Ball, R. Hoffman, A. Odoni, and Ryan Rifkin. *A Stochastic Integer Program with Dual Network Structure and its Application to the Ground Holding Problem*. National Center of Excellence for Aviation Operations Research, 2003. *Oper. Res.*, vol. 51, no. 1. 5
- [12] A. C. Arruda Jr., C. Almeida, A. Leite, A. Crespo, and L. Weigang. Fairness analysis with cost impact for brasilia’s flight information region using reinforcement learning approach. *IEEE ITSC 2010, Ilha Madeira, Portugal*, 2010. 5
- [13] T. L. Turocy and B. von Stengel. *Game Theory*. Number 5. Computational, Discrete and Applicable Mathematics, 2001. CDAM Research Report LSE-CDAM-2001-09. 6, 7, 9, 66
- [14] J. F. Nash. Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 36:48 – 49, 1950. 7
- [15] J. F. Nash. *Non-cooperative games*. PhD thesis, Princeton University, 1950. 7, 8, 10, 59
- [16] B. A. Sartini, G. Garbugio, H. J. Bortolossi, P. A. Santos, and L. S. Barreto. *Uma Introdução a Teoria dos Jogos*. Universidade Federal da Bahia, 2004. II Bienal da Sociedade Brasileira de Matemática. 7
- [17] A.K. Agogino and K. Tumer. Analyzing and visualizing multiagent rewards in dynamic and stochastic domains. *VII International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 5 2008. Estoril, Portugal. 8
- [18] S.W. Wilson. Classifier systems for continuous payoff environments. *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 6 2004. Seattle, USA. 9
- [19] C. A. Holt and A. E. Roth. The nash equilibrium: A perspective. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 101(12):3999 – 4002, 2004. 9, 10
- [20] C. J. Petrie, T. A. Webster, and M. R. Cutkosky. Using pareto optimality to coordinate distributed agents. *Artificial Intelligence for Engeneering Design, Analysis and Manufacturing*, 9:269–281, 1995. 11
- [21] M.S. Bugarin and M.A.O. Sotomayor. Lições de teoria dos jogos, 05 2007. São Paulo, Brasil. 12, 15, 16, 70
- [22] M. Sotomayor. An elementary non-constructive proof of the non-emptiness of the core of the housing market of sharpely and scarf, 1992. Universidade de São Paulo-SP. 12
- [23] D. Gale and L. S. Shapley. College admissions and the stability of marriage. *The American Mathematical Monthly*, 69(1):9 – 15, 1962. 14

- [24] A. L. Manocchio. Teoria dos jogos e negociação, 12. 16
- [25] M. Yildiz. Nash meets rubinstein in final-offer arbitration. *Massachusetts Institute of Technology, Economics Department*, 11 2010. 17
- [26] M. Ball, R. Hoffman, D. Knorr, J. Wetherly, and M. Wambsganss. Assessing the benefits of collaborative decision making in air traffic flow management. *3rd USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, Abril 2000. 21, 50
- [27] M. Groppe, R. Paglieri, and D. Harris. Field observations during airport-cdm turn-round process: Study on airline's approach to tobt assignment, 2010. EUROCONTROL Experimental Centre. 21, 22, 24
- [28] EUROCONTROL. *Airport CDM Implementation - The Manual for Collaborative Decision Making*. Eurocontrol, 2010. 21, 34, 35, 58
- [29] EUROCONTROL. *Airport CDM Applications Guide*. Eurocontrol, 2003. 22, 23, 24, 52
- [30] Technische Universität Berlin Department of Flight Guidance and Air Transportation. Airline operations: Management, operation and cost assessment, 09 2007. Summer Schools Abroad, Rio de Janeiro - RJ. Lecture Documentation: Introduction to Aircraft Performance. 24, 29, 30
- [31] G. M. Camargo. Controle da pressão seletiva em algoritmo genético aplicado à otimização de demanda em infra-estrutura aeronáutica. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 2006. 26, 28
- [32] International Civil Aviation Organization. *International Standards and Recommended Practices - Air Traffic Services*, volume 11. International Civil Aviation Organization, 2001. 27
- [33] Comando da Aeronáutica. *Diretrizes para Implementação de Programas de Garantia de Qualidade nos Serviços de Tráfego Aéreo*, volume MCA 100-12. DECEA, 2004. 27, 28
- [34] A. M. G. Silva. Sistema de simulação acelerado para análise de fluxo de tráfego aéreo. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2001. 27, 29, 44
- [35] P. B. Liu, M. Hansen, and A. Mukherjee. Scenario-based air traffic flow management: Developing and using capacity scenario trees. *Transportation Research Board Annual Meeting*, 1, 2006. 31
- [36] P. van Leeuwen, H.H. Hesselink, and J.H.T. Rohling. Scheduling aircraft using constraint satisfaction. *11th Workshop for Functional and (constraint) Logic Programming*, 6 2002. 31, 33, 49

- [37] L. P. Rosa. Utilização de algoritmo genético para gerenciamento de sequenciamento de táxi, 2012. Monografia apresentada como requisito parcial para conclusão do Licenciatura em Computação pela UnB. 33
- [38] Civil Aviation Authority of New Zealand. Wake turbulence, 2008. Good Aviation Practice. 36, 38
- [39] Comando da Aeronáutica. *Plano de Voo*, volume ICA 100-11. Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo, 2000. 39, 41
- [40] Comando da Aeronáutica. *Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo*, volume ICA 100-12. DECEA, 2006. 40
- [41] Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea. <http://www.cgna.gov.br/rpl/>, 02 2013. Base de planos de voos válidos do CGNA. Acessado em 11/02/2013, às 21:00. 41
- [42] Comando da Aeronáutica. *Serviços de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo*, volume ICA 100-22. DECEA, 2007. 42
- [43] DECEA. <http://www.decea.gov.br/>, 7 2011. Acessado em 10/07/2011, às 17:00. 42, 44
- [44] M. V. P. Dib. Sistema multi-agentes para sincronização e gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo em tempo real. Master's thesis, Universidade de Brasília - Departamento de Ciência da Computação, 2004. 44
- [45] C. A. S. C. Neto and F. H. Souza. *Aeroportos no Brasil: Investimentos Recentes, Perspectivas e Preocupações*. Number 5. Instituto e Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA, 2011. Nota técnica da Diretoria de Estudos Setoriais. 45
- [46] Infraero. Anuário estatístico operacional, 2011. Coordenação de Estatística e Estudos de Demanda Operacional. 46
- [47] K. Zografos, Y. Salourasa, and M. Madas. Dealing with the efficient allocation of scarce resources at congested airports, Manuscript number TRC-D-11-00065. Transportation Systems and Logistics Laboratory (TRANSLOG), Athens University of Economics and Business. 48
- [48] European Organisation for the Safety of Air Navigation. *DMAN Prototype - Description of DMAN in the A-CDM context*, volume 0.4. Eurocontrol, 2010. 51
- [49] C. Shilin, H. Minghua, and Z. Honghai. Research on collaborative decision making system based on conversion of arrival and departure capacity, 05. 54, 58
- [50] D. Bertsimas and S. Gupta. Fairness in air traffic flow management. *INFORMS Meeting, San Diego - CA, USA*, 2009. 54, 100

- [51] V. Vaze and C. Barnhart. A multi-stakeholder evaluation of strategic slot allocation schemes under airline frequency competition. *9th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*, 6 2011. 55
- [52] S. R. Wolfe, P. A. Jarvis, F. Y. Enomoto, M. Sierhuis, and B. J. van Putten. A multiagent simulation of collaborative air traffic flow management. *NASA Ames Research Center*, 2007. 57
- [53] A.P.O. Santos, J.R. da Silva, F.A. Ugliara, R.L. Nacarato, A.F. Silva Jr, L.P. Figueredo, R.Y. Hayashi, A.C. Calicchio, A.P. Timoszczuk, and E. Siewerdt. Sistema para o gerenciamento de partidas em aeroportos. *X Simpósio de Transporte Aéreo, Universidade Federal de Ouro Preto - MG*, 1, 2011. 73, 102
- [54] International Civil Aviation Organization. *Manual on Simultaneous Operations on Parallel or Near-Parallel Instrument Runways (SOIR)*. International Civil Aviation Organization, 1 edition, 2004. 89