



**Universidade de Brasília**

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

**Aprendizagem por Reforço Aplicada à Análise de Impacto no Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo**

Antonio Carlos de Arruda Junior

Brasília  
2009



**Universidade de Brasília**

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

**Aprendizagem por Reforço Aplicada à Análise de  
Impacto no Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo**

Antonio Carlos de Arruda Junior

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Mestrado em Computação

Orientador  
Prof. Dr. Li Weigang

Brasília  
2009

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

Coordenador: Prof. Dr. Li Weigang

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Li Weigang (Orientador) — CIC/UnB  
Prof. Dr. João Batista Camargo Junior — POLI/USP  
Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho — ENM/UnB

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

Arruda Junior, Antonio Carlos de .

Aprendizagem por Reforço Aplicada à Análise de Impacto no Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo / Antonio Carlos de Arruda Junior.  
Brasília : UnB, 2009.

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

Tese (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

1. Análise de Impacto, 2. Aprendizagem por Reforço, 3. Interação Homem-Computador (HCI), 4. Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM)

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

**Aprendizagem por Reforço Aplicada à Análise de  
Impacto no Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo**

Antonio Carlos de Arruda Junior

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Mestrado em Computação

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

Prof. Dr. João Batista Camargo Junior  
POLI/USP

Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho  
ENM/UnB

Prof. Dr. Li Weigang  
Coordenador do Mestrado em Computação

Brasília, 08 de dezembro de 2009

# Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, onde todo o conhecimento finalmente pode ser transformado em sabedoria.

À meus pais, Antonio Carlos e Regina, pelo exemplo de honestidade, esforço, dedicação e trabalho.

Aos meus irmãos, Letícia, André e João Paulo, pela amizade e apoio, em todos os momentos desta e de outras caminhadas.

E à minha esposa e filho, Angélica e Daniel, pelo amor, pelo carinho, compreensão, e por compartilhar comigo todos estes dias de sol e de chuva.

... AMO vocês!!!

# Agradecimentos

Muitas foram as pessoas que me auxiliaram na conclusão deste trabalho . . .

Aos amigos Alessandro Ferreira Leite, Bueno Borges de Souza, Cícero Roberto Ferreira de Almeida, Marcelo Amarante Ferreira Gomes, Moacir da Cruz Souza Filho, e Shana Schlottfeldt Santos, pela ajuda nos trabalhos, nos seminários, nas listas de exercício, e na preparação para as provas. Sem vocês, seria impossível concluir mais este desafio.

Aos amigos e colegas de pós-graduação Victor Rafael Rezende Celestino e Maj. Antonio Márcio Ferreira Crespo, por compartilhar o conhecimento e experiência em suas áreas de trabalho. E à toda equipe responsável pelo gerenciamento e controle de fluxo de tráfego aéreo do CGNA e CINDACTA I. Seus desafios diários foram a fonte de inspiração para esta dissertação.

À todos os amigos da Diretoria de Tecnologia do Banco do Brasil, que “seguraram as pontas” durante os períodos de trabalhos, provas e workshops, mantendo “24 horas no ar” os sistemas sob nossa responsabilidade.

À Universidade de Brasília, por esta grande oportunidade de crescimento pessoal e profissional. Em especial, ao meu orientador, Li Weigang, por sua ajuda inestimável durante todo o caminho percorrido.

Ao Sr. Antonio Pedro Timoszczuk, da ATECH Tecnologias Críticas, pelo apoio e incentivo durante todo o desenvolvimento do protótipo do sistema.

Ao grupo de transporte aéreo da UnB, do qual faço parte há quase três anos, e a toda equipe de professores da pós-graduação em Computação.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a concretização de mais este sonho . . .

Muito obrigado a todos!

Antonio Carlos de Arruda Junior

*"Os caminhos que conduzem o homem ao saber são tão maravilhosos quanto o próprio saber."*

***Johannes Kepler***

# Resumo

Nos últimos anos, a crescente demanda mundial pelo uso de aeronaves como meio de transporte aumentou consideravelmente a complexidade do gerenciamento de tráfego no cenário aéreo.

Para se evitar ou reduzir pontos de congestionamento, os controladores de tráfego aéreo aplicam medidas restritivas às aeronaves em solo ou em ar. Entretanto, além das informações de redução do número de aeronaves em setores específicos, os impactos gerados por estas ações não são verificados.

Para auxiliar neste problema, este trabalho apresenta uma solução baseada em técnicas de Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence* - AI) e Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning* - RL), desenvolvida sob a metodologia HCI (*Human-Computer Interaction*), com aplicação na área de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management* - ATFM).

A solução foi modelada como um Sistema de Apoio a Decisão (*Decision Support System* - DSS), através da construção do Submódulo de Modelagem e Projeção de Impacto (MPI), parte do Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD), que compõe a integração modular do Sistema de Aplicação e Gerenciamento das Medidas de Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo (SISCONFLUX).

A arquitetura deste módulo utiliza um agente autônomo que, em situações de congestionamento, fornece sugestões de medidas restritivas aos controladores de tráfego aéreo, focadas no problema da espera em solo (*Ground Holding Problem* - GHP). O agente adquire conhecimento junto ao ambiente, através do algoritmo *Q-Learning*, avaliando a situação do cenário aéreo resultante das medidas restritivas sugeridas e das medidas restritivas aplicadas.

A avaliação dos cenários aéreos resultantes é realizada através de uma função que computa dados como o nível de congestionamento, o tempo de atraso imposto sobre as aeronaves, e um índice de impacto financeiro e de equidade na distribuição das medidas restritivas.

Os resultados utilizam dados de um ambiente real, formados pelo cenário aéreo da Região de Informação de Vôo de Brasília (FIR-BS), gerenciada pelo Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I).

A análise destes resultados aponta que, fatores como equidade e custos financeiros podem ser utilizados em conjunto com dados de congestionamentos, sem ferir normas de segurança, onde o agente aprende a sugerir ações ao controlador humano, que levam em conta o impacto gerado pelas ações tomadas.

**Palavras-chave:** Análise de Impacto, Aprendizagem por Reforço, Interação Homem-Computador (HCI), Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM)



# Abstract

In recent years, the growing worldwide demand for the use of aircraft as a means of transport has considerably increased the complexity of managing air traffic scenario.

To avoid or reduce points of air traffic congestion, air traffic controllers apply restrictive measures to aircraft on the ground or air. However, just the information about aircraft congestions are verified. So, the impacts of these actions are not checked.

To solve this problem, this project presents a solution based on Artificial Intelligence (AI) and Reinforcement Learning (RL), developed under the methodology HCI (Human-Computer Interaction), with application in Air Traffic Flow Management (ATFM).

The solution was modeled as a Decision Support System (DSS) through the construction of Submodule of Modeling and Projection Impact (MPI), part of the Module Evaluation and Decision Support (MAAD), integrated to the Distributed System of Decision Support (SISCONFLUX).

The architecture of MAAD uses autonomous agents that in situations of congestion provide suggestions for restrictive measures to controller's traffic, focused on the Ground Holding Problem (GHP). The agent acquires knowledge from the environment, through the algorithm Q-Learning, assessing the situation of air scenario resulting of the restrictive suggested and the restrictive measures taken.

The evaluation of scenario is performed through a function that computes data such as congestion level, time delay imposed to aircrafts, an index of financial impact and fairness in the distribution of the GHP restrictions.

The results of simulation were obtained using real data from the air Flight Information Region Brasilia (FIR-BS), with is managed by the First Integrated System of Air Defense and Control (CINDACTA I).

The tests show that factors as fairness and financial costs can be used together with congestion data in the evaluating function without affecting the safety factor. In this environment the agent can learn and suggest actions to the air traffic managers and controllers taking account the impact generated by restrictive measures.

**Keywords:** Impact Analysis, Reinforcement Learning, Human-Computer Interaction (HCI), Air Traffic Flow Management (ATFM)

# Abreviaturas

- AA** – Agentes Autônomos (*Autonomous Agents*)
- AAR** – Taxa de Chegada no Aeroporto (*Airport Accepting Rate*)
- AI** – Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence*)
- AIS** – Serviço de Informação Aeronáutica (*Aeronautical Information Service*)
- ACC** – Centro de Controle de Área (*Area Control Center*)
- ACC-BS** – Centro de Controle de Área de Brasília
- AD** – Aeródromo (*Aerodrome*)
- AHP** – Problema de Espera em Ar (*Airborne Holding Problem*)
- ANAC** – Agência Nacional de Aviação Civil
- APP** – Controle de Aproximação (*Approach Control*)
- AS** – Serviço de Alerta (*Alert Service*)
- ASM** – Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management*)
- ATC** – Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control*)
- ATFM** – Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*)
- ATM** – Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*)
- ATS** – Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Service*)
- ATZ** – Zona de Tráfego de Aeródromo (*Aerodrome Traffic Zone*)
- AWY** – Aerovias (*Airways*)
- BDS** – Banco de Dados SISCONFLUX
- CATFM** – ATFM Colaborativo (*Collaborative Air Traffic Flow Management*)
- CBR** – Raciocínio Baseado em Casos (*Case-Based Reasoning*)
- CGNA** – Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea

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

**CopM1** – Centro de Operações Militares de Brasília

**CTA** – Área de Controle (*Control Area*)

**CTG** – Controle de Tabelas Gerais

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

**DSS** – Sistema de Apoio à Decisão (*Decision Support System*)

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

**ERC** – Carta de Rota (*Enroute Chart*)

**FAA** – *Federal Aviation Administration*

**FIR** – Região de Informação de Vôo (*Flight Information Region*)

**FIR-BS** – Região de Informação de Vôo de Brasília

**FIS** – Serviço de Informação de Vôo (*Flight Information Service*)

**FL** – Nível de Vôo (*Flight Level*)

**FMC** – Célula de Gerenciamento de Fluxo (*Flux Management Cell*)

**FPL** – Plano de Vôo Eventual (*Filed Flight Plan*)

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

**HCI** – Interação Homem-Máquina (*Human-Computer Interaction*)

**IA** – Agentes Inteligentes (*Intelligent Agents*)

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

**ICEA** – Instituto de Controle do Espaço Aéreo

**IFR** – Regras de Vôo por Instrumentos (*Instrument Flight Rules*)

**INFRAERO** – Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária

**MAAD** – Módulo de Avaliação e Apoio a Decisão

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

**MAS** – Sistema Multiagente (*Multi-Agent System*)

**MBF** – Módulo de Balanceamento de Fluxo

**MCA** – Modelagem do Cenário Atual

**MDP** – Processos Decisórios de Markov (*Markov Decision Process*)

**MIS** – Módulo de Interface do Sistema

**MPC** – Módulo de Projeção de Cenário

**MPI** – Modelagem e Projeção de Impacto

**RL** – Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning*)

**RPL** – Plano de Voo Repetitivo (*Repetitive Flight Plan*)

**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

**SISSAR** – Sistema de Busca e Salvamento

**SPV** – Sistema de Proteção ao Voo

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

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

**SYNCRMAX** – Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo

**TI** – Tecnologia da Informação

**TMA** – Área de Controle Terminal (*Terminal Maneuvering Area*)

**TRW** – Torre de Controle de Aeródromo (*Tower*)

**UAN** – Notação de Ação do Usuário (*User Action Notation*)

**UTA** – Área Superior de Controle (*Upper Control Area*)

**VFR** – Regras de Voo à Vista (*Visual Flight Rules*)

# Lista de Figuras

2.1	<i>Documento de Plano de Vôo RPL (CGNA, 2007)</i> . . . . .	9
2.2	<i>Subdivisão do espaço aéreo controlado (Rolim et al., 2004)</i> . . . . .	12
2.3	<i>Divisão Horizontal do Espaço Aéreo</i> . . . . .	13
2.4	<i>Espaço Aéreo Vertical Inferior e Superior</i> . . . . .	13
2.5	<i>Foco do serviço de ATFM, adaptado de (Dib, 2004)</i> . . . . .	14
2.6	<i>Domínios dos Vôos do Controle de Tráfego Aéreo (Dib, 2004)</i> . . . . .	16
2.7	<i>TWR - Torre de Controle - Aeroporto Internacional de Guarulhos</i> . . .	17
2.8	<i>APP - Centro de Controle de Aproximação de Brasília</i> . . . . .	17
2.9	<i>ACC - Centro de Controle de Área de Brasília</i> . . . . .	18
2.10	<i>Relação entre áreas de responsabilidade de cada órgão</i> . . . . .	18
2.11	<i>Regiões de Informação de Vôo (FIR) no Brasil (Rolim et al., 2004)</i> . .	19
2.12	<i>Setores, Terminais e aerovias da FIR-BS</i> . . . . .	20
2.13	<i>As Fases de Operação de um Vôo IFR (Camargo, 2006)</i> . . . . .	21
2.14	<i>Relacionamento Funcional Sistêmico do CGNA (Dib, 2004)</i> . . . . .	24
2.15	<i>Regiões de Informação de Vôo sob responsabilidade dos CINDACTAs (Ribeiro e Ribeiro, 2008)</i> . . . . .	26
2.16	<i>Controladores e a estação X-4000</i> . . . . .	29
3.1	<i>Relacionamento entre os modelos Sistema, HCI e Operador. Adaptado de (LeadBetter et al., 2000)</i> . . . . .	34
3.2	<i>Proposta de alteração de display ATC. Adaptado de (Palmer et al., 2008)</i>	36
3.3	<i>Arquitetura dos agentes no ATFSM-MAS (Dib, 2004)</i> . . . . .	37
3.4	<i>Arquitetura dos agentes TMU e AOC (Wolfe et al., 2008)</i> . . . . .	43
4.1	<i>Integração do STVD / SYNCROMAX com os módulos do SISCONFLUX</i>	49
4.2	<i>Simplificação do Fluxo de Processos do SISCONFLUX (adaptado de Ribeiro e Ribeiro, 2008)</i> . . . . .	50
4.3	<i>Arquitetura do MAPC</i> . . . . .	52
4.4	<i>Simplificação dos Cenários Aéreos Produzidos pelo MAPC</i> . . . . .	54
4.5	<i>Diagrama de Atividades do MBF (Souza, 2008)</i> . . . . .	55
4.6	<i>Arquitetura do Módulo de Balanceamento de Fluxo (Crespo et al. 2007)</i>	56
4.7	<i>Construção de um Grafo da FIR-BS (Souza, 2008)</i> . . . . .	57
4.8	<i>Matriz e Lista de Adjacência do Grafo (Souza, 2008)</i> . . . . .	58
4.9	<i>Modelo de dados relacional (Souza, 2008)</i> . . . . .	60
5.1	<i>Função de Avaliação</i> . . . . .	64
6.1	<i>Integração entre os módulos do SISCONFLUX</i> . . . . .	70

6.2	<i>Arquitetura do SISCONFLUX sem o módulo MAAD . . . . .</i>	71
6.3	<i>Arquitetura do SISCONFLUX com o módulo MAAD . . . . .</i>	72
7.1	<i>Pacotes de Classes do MAAD . . . . .</i>	84
7.2	<i>Classes do Pacote Data Access Object . . . . .</i>	85
7.3	<i>Classes do Pacote Business Objects . . . . .</i>	86
7.4	<i>Tabelas de Banco de Dados do MAAD . . . . .</i>	87
7.5	<i>Interface do SISCONFLUX (Nitto et al., 2009) . . . . .</i>	88
8.1	<i>Tabela Agente – Resultado: data / hora do ciclo, responsável pelo cálculo da ação, e valores das medidas restritivas, por Terminal . . . . .</i>	92
8.2	<i>Terminal São Paulo: melhores medidas restritivas, por função de avaliação . . . . .</i>	93
8.3	<i>Terminal Vitória: melhores medidas restritivas, por função de avaliação . . . . .</i>	94
8.4	<i>Terminal Amazônica: melhores medidas restritivas, por função de avaliação . . . . .</i>	95

# Lista de Tabelas

6.1	<i>Q-Table do MPI</i> . . . . .	75
6.2	<i>Estados: quantidade de aeronaves por dia / horário e setor</i> . . . . .	75
6.3	<i>Ações: tempo de decolagem sugerido por Terminal</i> . . . . .	76

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivo . . . . .	3
1.3 Metodologia . . . . .	4
1.4 Organização do Trabalho . . . . .	5
<b>2 Controle de Tráfego Aéreo</b>	<b>7</b>
2.1 O Espaço Aéreo . . . . .	7
2.2 O Planejamento de um Vôo . . . . .	8
2.2.1 Constituição do Plano de Vôo . . . . .	8
2.3 O Gerenciamento do Tráfego Aéreo . . . . .	10
2.4 Gerenciamento do Espaço Aéreo . . . . .	10
2.4.1 Divisão Horizontal . . . . .	11
2.4.2 Divisão Vertical . . . . .	13
2.5 Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo . . . . .	14
2.6 Serviços de Tráfego Aéreo . . . . .	15
2.6.1 Domínios do Espaço Aéreo . . . . .	15
2.6.2 Modalidades de Serviço . . . . .	16
2.7 Regiões de Informação de Vôo . . . . .	19
2.8 As Fases de Operação de um Vôo Controlado por um Órgão ATC . . .	20
2.9 O Gerenciamento de Tráfego Aéreo no Brasil . . . . .	22
2.9.1 Órgãos Competentes . . . . .	22
2.10 Controladores de Tráfego Aéreo . . . . .	27
2.11 Medidas Restritivas . . . . .	28
2.12 Os Sistemas Utilizados no Controle de Tráfego Aéreo Brasileiro . . .	29
2.13 Descrição do Problema . . . . .	30
<b>3 Trabalhos Relacionados</b>	<b>32</b>
3.1 Abordagens em Sistemas Especialistas . . . . .	32
3.1.1 Sistema Especialista para Gerenciamento de Tráfego Aéreo .	32
3.2 Abordagem Utilizando Interação Homem-Máquina . . . . .	33
3.2.1 Rumo a um Modelo de Predição de Taxas de Erro Humano em Sistemas Interativos . . . . .	33



3.2.2	Melhorando Displays de Tráfego Aéreo Através de Sugestões de Percepção . . . . .	35
3.3	Abordagens em Sistemas Multiagente . . . . .	37
3.3.1	Sistema Multiagentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo . . . . .	37
3.3.2	Gerenciamento Adaptativo de Fluxo de Tráfego Aéreo: Uma Abordagem de Coordenação Multiagente . . . . .	39
3.3.3	Uma Simulação Multiagente de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Colaborativo . . . . .	42
3.4	Abordagens em Programação Inteira . . . . .	46
3.4.1	Equidade no Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo . . . . .	46
3.5	Abordagem da Proposta Sugerida . . . . .	47
<b>4</b>	<b>SISCONFLUX</b>	<b>48</b>
4.1	Visão Geral . . . . .	48
4.2	Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC) . . . . .	51
4.2.1	Controle de Tabelas Gerais (CTG) . . . . .	52
4.2.2	Modelagem do Cenário Atual (MCA) . . . . .	52
4.2.3	Modelagem e Projeção de Cenário (MPC) . . . . .	53
4.3	Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF) . . . . .	54
4.3.1	Construção de Grafos ( <i>SMConstrutorGrafo</i> ) . . . . .	57
4.3.2	Análise de Fluxos Aéreos ( <i>SMAnalisador</i> ) . . . . .	58
4.3.3	Persistência do BDS ( <i>Persistencia</i> ) . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Fundamentos Teóricos e Metodologia</b>	<b>61</b>
5.1	Interação Homem-Máquina . . . . .	61
5.2	Agentes Inteligentes . . . . .	62
5.3	Aprendizagem por Reforço . . . . .	63
5.3.1	Processos Decisórios de <i>Markov</i> . . . . .	65
5.3.2	O Algoritmo <i>Q-Learning</i> . . . . .	65
5.4	Metodologia de Implementação . . . . .	66
5.4.1	Definição da Metodologia HCI . . . . .	66
5.4.2	Definição da Metodologia de Projeção de Impacto . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Arquitetura e Modelagem</b>	<b>69</b>
6.1	Visão Geral do Sistema . . . . .	69
6.2	A Arquitetura do Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD) . . . . .	70
6.3	Controle de Fluxo . . . . .	71
6.4	Modelagem do Agente . . . . .	73
6.4.1	Escolhendo o Agente . . . . .	73
6.4.2	Tabela de Recompensas ( <i>Q-Table</i> ) . . . . .	74
6.4.3	Estados do Ambiente . . . . .	75
6.4.4	Conjunto de Ações . . . . .	75
6.5	Aprendizagem e Estrutura de Recompensa . . . . .	76
6.5.1	<i>Função de Avaliação</i> : Minimizando Congestionamentos . . . . .	77
6.5.2	<i>Função de Avaliação</i> : Minimizando Atrasos . . . . .	78
6.5.3	<i>Função de Avaliação</i> : Impacto de Custos Financeiros e Equidade . . . . .	79

<b>7</b>	<b>Implementação</b>	<b>82</b>
7.1	Orientação a Objetos . . . . .	82
7.2	O Ambiente de Desenvolvimento . . . . .	82
7.3	O Ambiente de Execução . . . . .	83
7.4	O Protótipo do Modelo . . . . .	83
7.5	Implementação do Modelo . . . . .	84
<b>8</b>	<b>Experimentos e Resultados</b>	<b>90</b>
8.1	Planejamento do Estudo de Caso . . . . .	91
8.2	Caso 1: Situação de Alto Movimento . . . . .	93
8.2.1	Resultados para a Terminal São Paulo . . . . .	93
8.3	Caso 2: Situação de Médio Movimento . . . . .	94
8.3.1	Resultados para a Terminal Vitória . . . . .	94
8.4	Caso 3: Situação de Baixo Movimento . . . . .	95
8.4.1	Resultados para a Terminal Amazônica . . . . .	95
8.5	Discussão de Resultados . . . . .	96
8.5.1	Validação do Modelo . . . . .	97
8.5.2	Avaliação de Desempenho . . . . .	97
<b>9</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>99</b>
9.1	Avaliação do Modelo . . . . .	100
9.2	Resumo de Contribuições e Pesquisas Futuras . . . . .	101
	<b>Referências</b>	<b>103</b>

# Capítulo 1

## Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias e o aprimoramento das existentes, tornando-as mais flexíveis e adaptáveis às necessidades do ser humano, é uma das metas mais importantes para a evolução da ciência como um todo e, em especial, para as áreas relacionadas a Tecnologia da Informação (TI).

Quando estas melhorias procuram aumentar a segurança e o bem-estar da sociedade, estes esforços ganham um aspecto mais nobre e essencialmente obrigatório ao pesquisador e cientista. Neste contexto, a área de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management* - ATFM), devido ao aumento considerável da quantidade de aeronaves que utilizam o espaço aéreo brasileiro nos últimos anos, tem-se mostrado foco importante para estas melhorias.

Desta forma, neste trabalho será abordado a utilização de técnicas de Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence* - AI) com a finalidade de auxiliar os profissionais envolvidos no ATFM, buscando dar suporte às decisões envolvidas no controle de congestionamentos, sendo esta, uma das tarefas de maior importância no controle do espaço aéreo mundial.

### 1.1 Motivação

Segundo (Donohue, 2008), a *Federal Aviation Administration* (FAA) estima um crescimento da demanda pelo espaço aéreo em aproximadamente 300% durante as próximas décadas.

Nos últimos três anos, este aumento no tráfego de aeronaves já afeta de maneira significativa o espaço aéreo brasileiro, onde problemas como atrasos constantes e cancelamento de vôos tornaram-se cada vez mais frequentes, conforme pode ser verificado nas estatísticas da Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária (INFRAERO, 2009).

Entretanto, foram alguns acidentes aéreos ocorridos recentemente no Brasil e em outros locais do mundo, noticiados nos principais meios de comunicação, que tornaram o ATFM assunto de relevante importância na mídia nacional e internacional.

Este serviço de gerenciamento, executado no Brasil por órgãos de Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control* - ATC), é caracterizado como uma tarefa complexa devido ao elevado número de variáveis associadas ao processo, onde os riscos

envolvem garantir a segurança de aeronaves e passageiros e controlar custos operacionais.

Segundo (Rolim et al., 2004), o principal objetivo do Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management* - ATM) é garantir vôos seguros, regulares e eficazes, balanceando as necessidades dos usuários do espaço aéreo com a capacidade da infra-estrutura aeronáutica e aeroportuária existente, respeitando as condições meteorológicas reinantes e as limitações operacionais das aeronaves.

Para se garantir estes objetivos, através da análise de dados como planos de vôo, a situação atual das aeronaves, condições meteorológicas, entre outros, procura-se detectar antecipadamente possíveis congestionamentos no espaço aéreo.

Para se evitar ou, ao menos, minimizar tais situações, é utilizado um conjunto de medidas restritivas de controle de fluxo às aeronaves, tanto em solo quanto em ar, envolvendo situações como redução de velocidade, espera em solo, definição de rota alternativa, etc.

Entretanto, mesmo com o apoio de sistemas de alta tecnologia envolvidos neste processo, a experiência humana ainda é um fator determinante para a efetividade das medidas restritivas aplicadas. Ou seja, quanto maior a experiência do profissional responsável por este serviço, melhor a decisão tomada.

Assim, como as medidas restritivas impostas ainda são escolhidas de forma empírica, e o aumento constante da demanda da utilização do espaço aéreo tem elevado consideravelmente a carga de trabalho sobre os profissionais do ATFM, conclui-se que a decisão sobre as ações aplicadas é parcialmente eficaz (Souza, 2008).

No Brasil, os principais softwares utilizados no ATFM são o Sistema de Tratamento e Visualização de Dados (STVD) e o Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo (SYNCROMAX) (Atech, 2009).

Estudos estatísticos e previsões do cenário aéreo são construídos com um horizonte de seis horas antes das decolagens, com a base nas informações fornecidas por estes softwares, mapeando possíveis situações onde seja necessário aplicar alguma medida restritiva.

Contudo, tais sistemas ainda não dispõem de ferramentas para o gerenciamento e sincronização de aeronaves, onde sejam incluídos acontecimentos ocorridos após a decolagem da aeronave, ou seja, levando-se em conta a real evolução do fluxo de tráfego no espaço aéreo.

Portanto, é possível verificar que ainda existe margem para melhorar o gerenciamento do fluxo de tráfego através da análise em tempo real pós-decolagem (Souza, 2008), levando-se em conta a importância estratégica e econômica associada aos objetivos do ATFM.

Diante do exposto, e devido à relevância da otimização das tecnologias envolvidas neste processo, um Sistema de Apoio à Decisão (*Decision Support System* - DSS) foi proposto em (Crespo et al., 2007) para auxiliar no gerenciamento das medidas tomadas no ATFM brasileiro.

Este sistema, denominado Sistema de Aplicação e Gerenciamento das Medidas de Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo (SISCONFLUX), foi elaborado com base nas tendências mundiais, onde a expectativa de aumento do tráfego no espaço aéreo aponta uma real necessidade de adequação das ferramentas de ATFM existentes.

## 1.2 Objetivo

O SISCONFLUX utiliza uma metodologia de desenvolvimento modular, visando auxiliar no apoio à decisão das medidas restritivas aplicadas ao contexto do cenário aéreo brasileiro.

Este sistema contempla uma solução para o problema da espera em solo (*Ground Holding Problem* - GHP). Esta solução é baseada em propostas de medidas restritivas caracterizadas por novos tempos de decolagem para aeronaves.

Ou seja, para se evitar congestionamentos no espaço aéreo, um novo tempo de decolagem será sugerido pelo sistema - por exemplo, de 15 em 15 minutos - onde a maximização do fluxo de aeronaves será priorizada. Assim, os aeroportos afetados poderão utilizar este tempo de decolagem, que será calculado sempre que se verificar um possível congestionamento.

No Brasil, a medida restritiva baseada na espera em solo é amplamente utilizada, justificando-se pela situação onde é melhor um voo aguardar em solo em seu ponto de origem, do que ter que aguardar no ar, sobre seu aeroporto de destino. Também, o fato das aeronaves ainda encontrarem-se em solo, possibilita uma maior economia de combustível para as companhias aéreas e uma maior segurança aos passageiros e a tripulação.

Com base no cenário exposto acima, é desnecessário destacar a importância referente a informações que indiquem quais ações devem ser tomadas e quais os impactos gerados pelas medidas restritivas aplicadas.

Portanto, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para avaliar o impacto das ações tomadas ao se gerenciar o congestionamento dos setores aéreos e implementar um subsistema integrado ao SISCONFLUX, em fase de projeto pelo Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I) e pela Universidade de Brasília (UnB).

O protótipo será construído como um submódulo de Modelagem e Projeção de Impacto (MPI), constituindo parte do Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD) do SISCONFLUX. A implementação fará uso da Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning* - RL), através do algoritmo *Q-Learning*, sendo desenvolvido sob a metodologia HCI (*Human-Computer Interaction*).

O submódulo MPI, foco principal deste trabalho, será descrito em detalhes nos Capítulos 6 e 7, e utiliza uma representação abstrata do cenário aéreo da Região de Informação de Voo de Brasília (*Flight Information Region* - FIR-BS), sob jurisdição do CINDACTA I.

Sua principal tarefa é, através de um agente autônomo, sugerir medidas restritivas ao controlador de tráfego aéreo, de forma que estas sugestões sejam avaliadas não só do ponto de vista referente a segurança e fluência do tráfego, mas também, sobre os impactos gerados pelas ações tomadas.

Podem-se destacar como objetivos gerais dessa pesquisa:

1. Auxiliar no apoio à decisão referente a medidas restritivas aplicadas pelos centros de controle;
2. Inserir no processo decisório, a visão de impacto gerado pelas ações tomadas;
3. Reduzir a carga de trabalho imposta aos controladores de voo.

Pode-se destacar como objetivos específicos dessa pesquisa:

1. A modelagem de um procedimento de apoio a decisão baseado em RL, com uma solução que considere os impactos ocasionados na execução do ATFM;
2. A definição de dois termos para uma função de impacto, que reflitam os custos financeiros e a equidade na distribuição das medidas restritivas aplicadas, baseadas na espera em solo;
3. A implementação de um protótipo que execute essa metodologia;
4. A coleta de dados reais da FIR-BS, utilizados pelo CINDACTA I e a realização do diagnóstico do problema apontado;
5. A realização de simulações com o modelo, utilizando dados reais e a avaliação do modelo desenvolvido.

### 1.3 Metodologia

Neste trabalho a RL utilizada é baseada no trabalho de (Watkins, 1989), utilizando o algoritmo *Q-Learning*, o qual implementa um processo decisório de *Markov* (*Markov Decision Process* - MDP).

Os impactos causados pelas medidas restritivas aplicadas afetam diversas entidades no processo do transporte aéreo, como passageiros, aeronaves, companhias aéreas, e aeroportos. Entretanto, neste trabalho avaliaremos apenas dois fatores, caracterizados pela equidade nas medidas restritivas aplicadas, e os custos financeiros decorrentes do atraso gerado. O protótipo deverá permitir a inclusão de mais funções, conforme novos estudos de análise de impacto forem sendo desenvolvidos.

As funções do Módulo de Projeção de Cenário (MPC), desenvolvido por (Ribeiro et al., 2008), serão utilizadas de forma que os cálculos e estimativas futuras das aeronaves irão compor a necessidade destas informações pelo sub-módulo de Modelagem e Previsão de Impacto.

A metodologia de desenvolvimento inclui algumas técnicas de análise de sistema HCI para a modelagem das interfaces do módulo. Conforme (Santos, 2002), estas interfaces devem proporcionar facilidade de uso e interação para o apoio às tarefas do usuário, visando fornecer melhor acesso à informação e criar formas mais poderosas de comunicação. Entretanto, a interface de integração do sistema utilizada foi desenvolvida e avaliada por (Nitto et al., 2009).

Para os testes realizados nesta fase, foi necessário a implementação de um protótipo que trabalha com os tempos dos vôos e a quantidade de aeronaves no espaço aéreo, bem como, o cálculo dos impactos gerados pelas medidas restritivas aplicadas.

Os dados de entrada utilizados são obtidos através de outros módulos do sistema SISCONFLUX, construídos a partir de uma base de dados real da FIR-BS fornecidos pelo CINDACTA I. Os resultados são apresentados no Capítulo 8.

Na implementação utilizou-se a plataforma Java (*Sun Microsystems*, versão 1.5) visando compatibilidade com o sistema SYNCROMAX, e o banco de dados relational MySQL 5.0.45, que proporciona testes na plataforma Windows, entre outras.

## 1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho foi elaborado de forma a introduzir os principais conceitos de gerenciamento de tráfego aéreo ao leitor. Também serão apresentadas a metodologia HCI e de Aprendizagem por Reforço, bem como, uma visão geral do algoritmo *Q-Learning*.

Posteriormente, será demonstrada a metodologia e a arquitetura do sistema proposto.

Abaixo será relatado um breve resumo de cada capítulo.

### Capítulo 1 - Introdução

Inicialmente, este capítulo trata da visão geral dos problemas do ATFM, contendo os objetivos gerais e específicos que serão atingidos no decorrer do trabalho. Uma breve descrição da metodologia e tecnologias empregadas também serão abordadas.

### Capítulo 2 - Controle de Tráfego Aéreo

Esta segunda etapa foi dedicada à apresentação dos principais conceitos do gerenciamento de tráfego aéreo. O leitor deverá estar familiarizado com estes conhecimentos para compreender o ambiente onde o sistema proposto vai atuar.

### Capítulo 3 - Pesquisas Relacionadas

Numa etapa seguinte, foram efetuadas pesquisas e levantamento dos estudos, metodologias e técnicas utilizadas na solução de problemas de controle de tráfego aéreo similares, por meio de revisão bibliográfica, para dar fundamentação teórica ao trabalho proposto, bem como compreender o estado da arte em ATFM.

### Capítulo 4 - SISCONFLUX

Como este trabalho baseia-se no desenvolvimento do MPI, parte do MAAD, que é um dos módulos do SISCONFLUX, ele utiliza informações originadas pelos demais módulos. Portanto, para compreensão do leitor, é imprescindível que seja abordada uma visão geral do Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC) e do Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF), já desenvolvidos, bem como, sejam apresentados objetivos, características, metodologia e arquitetura destes dois módulos.

### Capítulo 5 - Fundamentos Teóricos e Metodologias

Neste capítulo, serão apresentados os conhecimentos básicos a respeito das tecnologias empregadas nesta pesquisa, dentro da área de estudo, a fim de adquirir subsídios teóricos e científicos suficientes para o cumprimento dos objetivos estabelecidos. Os tópicos abordados serão a aprendizagem por reforço, a metodologia

HCI, o processo decisório de *Markov*, e o algoritmo *Q-Learning* e um resumo sobre a teoria de agentes inteligentes.

## **Capítulo 6 - Arquitetura e Modelagem**

No capítulo 6 serão apresentadas todas as definições necessárias à implementação do submódulo MPI. Nele, serão abordados a arquitetura do sistema, a modelagem do agente, as funções de recompensa definidas, bem como, o controle de fluxo da aprendizagem por reforço.

## **Capítulo 7 - Implementação**

Este capítulo trata da implementação propriamente dita, com as informações e dados utilizados para a construção do MPI. Será apresentada a modelagem do banco de dados, o relacionamento das tabelas, a linguagem de programação e o ambiente utilizado.

## **Capítulo 8 - Experimentos e Resultados**

Após as especificidades da construção do protótipo, serão apresentados os resultados adquiridos com uma massa de dados reais, fornecida pelo centro de controle aéreo. Através destes dados, serão feitas as devidas análises para a validação das funções propostas e a modelagem do agente.

## **Capítulo 9 - Conclusão e Trabalhos Futuros**

Finalmente, com base nos resultados obtidos dos experimentos com o protótipo construído, será feita uma conclusão quanto a análise dos resultados em relação ao impacto e a viabilidade da modelagem e da arquitetura empregada. Para a justificativa, será utilizado todo o embasamento teórico e científico abordados neste trabalho.



# Capítulo 2

## Controle de Tráfego Aéreo

Conforme visto no Capítulo anterior, a correta tomada de decisões no Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management - ATFM*) é de extrema importância para que o fluxo das aeronaves no espaço aéreo seja o mais seguro, rápido e econômico possível.

Para adequar o cenário aéreo a uma determinada demanda de fluxo de aeronaves, é papel dos centros de controle impor medidas restritivas às aeronaves no ar e em terra (Dib et al., 2007). Tal procedimento visa o gerenciamento de possíveis congestionamentos. Uma vez tomadas, essas medidas afetam o comportamento das demais aeronaves e conseqüentemente o cenário aéreo como um todo.

Neste capítulo será apresentada uma descrição geral do cenário aéreo e do seu gerenciamento, bem como do papel das pessoas, órgãos e sistemas envolvidos na sua execução. Entretanto, não se tem a pretensão de esgotar o assunto, onde serão apresentados apenas conceitos suficientes para a compreensão do ambiente no qual o sistema proposto vai atuar.

### 2.1 O Espaço Aéreo

Há algumas décadas, o uso do espaço aéreo era limitado, onde as aeronaves eram relativamente lentas e utilizavam uma instrumentação aeronáutica bastante primitiva. Assim, o volume de tráfego aéreo era considerado baixo, se limitando a vôos diurnos com boas condições climáticas.

Estes vôos seguiam as Regras de Vôo à Vista (*Visual Flight Rules - VFR*), onde o piloto é o responsável por controlar visualmente a aeronave, através de referência ao horizonte, assegurando a separação de obstáculos, terrenos e de outras aeronaves, devendo-se manter em áreas com um mínimo de visibilidade.

Entretanto, com o avanço da tecnologia aeronáutica e a diminuição dos custos envolvidos, entre outros fatores, a utilização deste meio de transporte cresceu muito nos últimos anos (Weigang et al., 2008), levando à necessidade de regulamentação dos vôos no espaço aéreo.

No cenário aéreo atual, os vôos contam com um conjunto mais desenvolvido de instrumentos e a maioria segue os procedimentos das Regras de Vôo por Instrumentos (*Instrument Flight Rules - IFR*), onde o gerenciamento do tráfego aéreo passa a ser desempenhado por órgãos de controle e não mais pelos pilotos.

## 2.2 O Planejamento de um Vôo

O Comando da Aeronáutica é responsável por estabelecer procedimentos para cada aeronave que decola de um Aeródromo (*Aerodrome* - AD) e entra no espaço aéreo brasileiro, onde são prestados Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Service* - ATS). Um desses procedimentos descreve a apresentação de uma documentação descritiva da intenção de execução de vôo por parte da aeronave, conhecida como Plano de Vôo.

O Plano de Vôo é um documento técnico oficial da navegação aeronáutica que contém informações relacionadas com o planejamento da rota de uma aeronave.

Este documento é utilizado para indicar toda a informação referente a rota pretendida, com o objetivo de obter uma aprovação de alocação no espaço aéreo (*Slot ATC*<sup>1</sup>). Por meio deste procedimento, um órgão de controle de tráfego aéreo autoriza a partida, a travessia e a chegada de uma aeronave a um determinado aeródromo controlado (Antunes, 2008). No Brasil, o órgão responsável por este procedimento é o Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA).

Para que os órgãos de controle possam gerenciar estes vôos em procedimento de Regras de Vôo por Instrumentos (*Instrument Flight Rules* - IFR), um cadastro prévio do Plano de Vôo deve ser realizado, contendo informações essenciais que possibilitem o controle e a alocação dos vôos, a análise de capacidade e a demanda, a antecipação do tratamento para possíveis congestionamentos, bem como, possibilitar a manutenção da utilização do espaço aéreo.

Para as operações com vôos regulares e as operações com vôos eventuais, um formulário próprio deve ser preenchido e submetido a um órgão competente, que fará a alocação junto aos demais vôos.

O Plano de Vôo Repetitivo (*Repetitive Flight Plan* - RPL) é o plano de vôo relativo a uma série de vôos regulares, com um alto grau de estabilidade, baseado no horário de transporte, que se realiza frequentemente com idênticas características básicas. Ele é apresentado pela companhia aérea ou pelo explorador interessado no vôo, para retenção e uso repetitivo pelos órgãos que executam os Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Service* - ATS) (CGNA, 2007).

O Plano de Vôo Eventual (*Filed Flight Plan* - FPL) refere-se a vôos esporádicos, de caráter único em sua utilização. Tal formulário deve ser apresentado para que o órgão responsável ajuste os vôos RPL já cadastrados, adequando a capacidade da malha aérea à nova demanda.

### 2.2.1 Constituição do Plano de Vôo

Conforme visto anteriormente, o processo de um vôo via IFR inicia-se com o preenchimento do formulário padrão de Plano de Vôo RPL ou FPL, onde consta toda a informação necessária à sua inclusão no fluxo de tráfego.

Para que possa ser gerenciado junto aos demais vôos escalonados, o vôo pretendido deve prover informações que são consideradas relevantes pelas autoridades de

---

<sup>1</sup>*Slot ATC* - intervalo de tempo estabelecido para uma aeronave realizar uma operação de pouso ou decolagem.

serviço de Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control* - ATC) (Antunes, 2008), tais como:

- Identificação da aeronave;
- Regras de vôo e tipos de vôo;
- Número e tipo de aeronave e turbulência da esteira;
- Equipamento;
- Aeródromo de partida;
- Hora de partida estimada;
- Velocidade de cruzeiro;
- Nível de Cruzeiro;
- Rota a ser seguida;
- Aeródromo de destino e tempo total estimado de vôo;
- Aeródromo alternativo;
- Autonomia.

Na figura 2.1 podemos ver um exemplo de plano de vôo RPL.

ANEXO 5																			
FORMULÁRIO DE PLANO DE VÔO REPETITIVO (IEPV 100-21)																			
PLANO DE VÔO REPETITIVO																			
A EXPLORADOR							B DESTINATÁRIO (S)			C AERÓDROMO DE PARTIDA				D	E	F			
							CENTRAL DE PLANOS DE VÔO REPETITIVOS AV. BRIG. FARIA LIMA, 1941 SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP <b>12227-000</b>							DATA	NÚM. DE SÉRIE	PÁGINA			
														G INFORMAÇÕES SUPLEMENTARES (ITEM 19) EM:					
H	I	J	K				L	M	N	O			P	Q					
			DIAS DE OPERAÇÃO				IDENTIFICAÇÃO DA AERONAVE (ITEM 7)	TIPO DE AERONAVE E CATEGORIA DA ESTEIRA DE TURBULÊNCIA (ITEM 9)	AERÓDROMO DE PARTIDA E HORA (ITEM 13)	ROTA (ITEM 15)			AERÓDROMO DE DESTINO E DURAÇÃO TOTAL PREVISTA (ITEM 16)	OBSERVAÇÕES					
+	VÁLIDO DE	VÁLIDO ATÉ	1	2	3	4				5	6	7			VELOCIDADE DE CRUZEIRO	NÍVEL	ROTA		

Figura 2.1: Documento de Plano de Vôo RPL (CGNA, 2007)

## 2.3 O Gerenciamento do Tráfego Aéreo

O Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management - ATM*) é uma atividade composta de diversos segmentos que desenvolvem processos específicos, cooperativos e simultâneos. Seu objetivo geral é garantir vôos seguros, regulares e eficazes, balanceando as necessidades dos usuários do espaço aéreo com a capacidade da infra-estrutura aeronáutica e aeroportuária existente, respeitando as condições meteorológicas e as limitações operacionais das aeronaves (Souza et al., 2008).

Neste espaço, diversos eventos como vôos comerciais, militares e asa deltas, lançamentos de foguetes, salto de pára-quedas, entre outros, acontecem simultaneamente. Para se garantir a convivência segura destes eventos, o ATM estabelece estruturas, procedimentos e regras de utilização do espaço aéreo, baseado na demanda de tráfego aéreo atual e futura e na topologia e infra-estrutura instalada.

Quanto aos objetivos específicos, citando (DECEA, 2009), o ATM deve estabelecer:

- 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, 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.

Segundo (Rolim et al., 2004), a tarefa de se gerenciar o tráfego de aeronaves não é uma atividade única, subdividindo-se em três segmentos: Gerenciamento do Espaço Aéreo, Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo e Serviços de Tráfego Aéreo.

## 2.4 Gerenciamento do Espaço Aéreo

O Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management - ASM*) busca o uso flexível do espaço aéreo, com o objetivo de aumentar a sua capacidade, a eficiência e a flexibilidade das operações aeronáuticas.

Para possibilitar regras que se adaptem às diferentes performances das aeronaves e permitir uma gerência mais eficaz, fazendo com que o tráfego aéreo seja melhor organizado, o espaço aéreo foi estruturado da seguinte forma: divisão horizontal e divisão vertical.

## 2.4.1 Divisão Horizontal

A divisão horizontal do espaço aéreo é realizada em grandes aéreas, podendo estar ou não cobertas por radares e um sistema de processamento de dados, sendo organizada segundo três conceitos: Espaço Aéreo Controlado, Espaço Aéreo Não-Controlado e Espaço Aéreo Condicionado.

### Espaço Aéreo Controlado

Ambiente conhecido, onde o espaço aéreo possui dimensões bem definidas, destinados a prestação de serviços de controle de tráfego aéreo. Nessas áreas, todos os movimentos aéreos são controlados por um órgão ATC, com definições pré-estabelecidas de manobras que garantam a segurança das aeronaves em solo e em vôo. Estes espaços são classificados em:

- 1 *Aeródromo (Aerodrome - AD)* - aeródromo é um termo para qualquer local a partir do qual se realizam operações de vôo, independentemente se elas envolvem carga ou passageiros (por exemplo, um aeroporto). Sua área pode ser definida em terra ou na água, incluindo os edifícios, as instalações e os equipamentos necessários ao controle dos movimentos aéreos na zona do aeródromo, bem como a partida e a chegada das aeronaves.
- 2 *Aerovias (Airways - AWY)* - para facilitar seu gerenciamento, o espaço aéreo foi dividido em um número finito de vias aéreas, também conhecidas como aerovias. Essas aerovias caracterizam-se como áreas controladas dispostas em corredor, sendo providas ou não de auxílio à navegação, por onde trafegam aeronaves com origem e destino pré-definidos, sendo que algumas possuem sentido único, enquanto outras possuem tráfego em ambas as direções. As aerovias originam-se e terminam em uma Área de Controle Terminal (*Terminal Maneuvering Area - TMA*).
- 3 *Áreas Superiores de Controle (Upper Control Area - UTA)* - são aerovias superiores e outras partes do espaço aéreo superior definidas nas cartas de rota.
- 4 *Áreas de Controle (Control Area - CTA)* - são aerovias inferiores e outras partes do espaço aéreo inferior definidas nas cartas de rota.
- 5 *Áreas de Controle Terminal (Terminal Maneuvering Area - TMA)* - são áreas situadas na confluência de rotas ATS e nas imediações de aeródromos. A TMA corresponde a um espaço aéreo controlado situado na confluência das aerovias, para procedimentos de aproximação e saída de aeronaves em um ou mais aeródromos, contendo uma ou mais Zonas de Controle (*Control Zone - CTR*).
- 6 *Zonas de Controle (Control Zone - CTR)* - são áreas nas quais estão definidas trajetórias de decolagem e pouso de vôos repetitivos. As CTR são áreas protegidas para aeronaves que estão partindo ou chegando a uma TMA, envolvendo um ou mais aeródromos próximos, onde estão definidas trajetórias e procedimentos de decolagem e pouso por instrumentos de vôos RPL.

7 *Zonas de Tráfego de Aeródromo (Aerodrome Traffic Zone - ATZ)* - espaço onde as aeronaves evoluem sob condições visuais, ou seja, durante o pouso, decolagem ou manobras em solo.

Na figura 2.2 abaixo é possível ver uma simplificação dos conceitos de zonas de controle, áreas de controle de Terminal e aerovias.

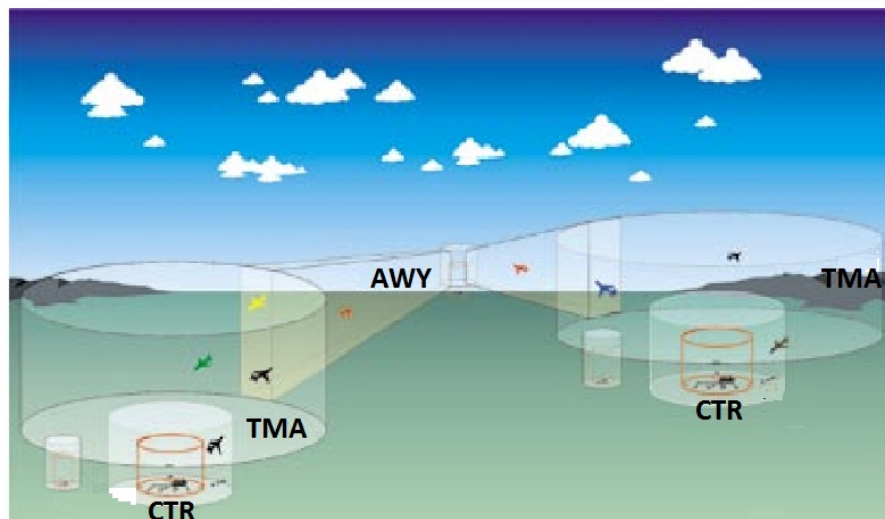


Figura 2.2: *Subdivisão do espaço aéreo controlado (Rolim et al., 2004)*

### **Espaço Aéreo Não-Controlado**

São áreas do espaço aéreo onde as aeronaves voam em ambiente parcialmente conhecido, não sendo gerenciado por um órgão ATC. Nesse espaço aéreo, a responsabilidade em manter a separação entre as aeronaves é exclusiva dos pilotos, contando somente serviços de informação de voo e de alerta.

### **Espaço Aéreo Condicionado**

Define ambientes onde são realizadas atividades específicas, normalmente envolvendo riscos à navegação aérea, como lançamento de foguetes, balões de sondagem, treinamento de aeronaves militares, tiro, ensaios em voo e outras, que não permitem a aplicação dos serviços de tráfego aéreo. Estas áreas do espaço aéreo podem ser classificadas como:

- 1 áreas proibidas - espaços aéreos nos quais o voo é proibido;
- 2 áreas perigosas - existem riscos potenciais para a navegação. Geralmente, estes riscos são de natureza física, como montanhas ou condições meteorológicas adversas;
- 3 áreas restritas - o voo é permitido apenas sob determinadas condições.

Na figura 2.3, podemos ver uma representação da divisão horizontal:

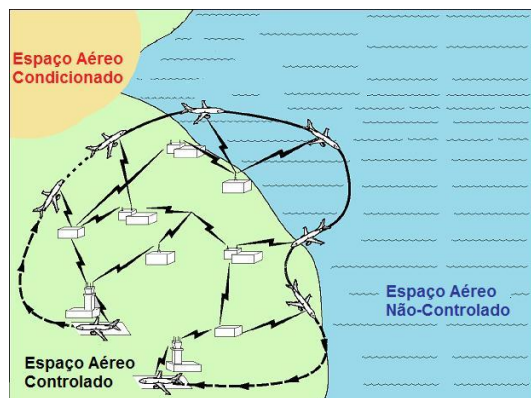


Figura 2.3: *Divisão Horizontal do Espaço Aéreo*

## 2.4.2 Divisão Vertical

A divisão vertical do espaço aéreo sob jurisdição do Brasil, compreende a totalidade do espaço aéreo vertical inferior e do espaço aéreo vertical superior (Naufal and Camargo Júnior, 2005) *apud* (Camargo, 2006).

- *Espaço Aéreo Vertical Inferior* - no espaço aéreo inferior encontram-se os Aeródromos, as Zonas de Controle e as Áreas Terminais, compreendendo o espaço aéreo igual ou abaixo de 24.500 pés. Define-se como limite inferior, o solo ou a água, e como limite superior, o nível de vôo 245 (FL 245).
- *Espaço Aéreo Vertical Superior* - nas delimitações do espaço aéreo superior encontram-se as Aerovias, onde as aeronaves realizam a fase de vôo denominada *cruzeiro*, compreendendo o espaço aéreo acima de 24.500 pés. Define-se como limite inferior, o nível de vôo de 245 (FL 245), e um limite superior ilimitado.

Na figura 2.4 podemos ver a divisão vertical do espaço aéreo:

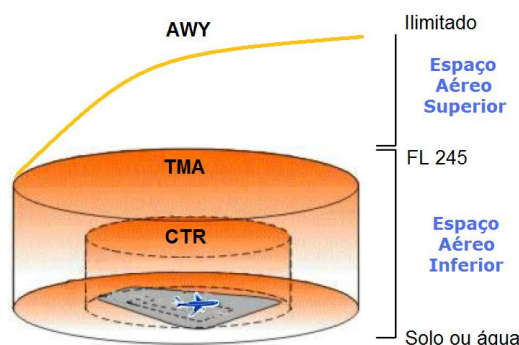


Figura 2.4: *Espaço Aéreo Vertical Inferior e Superior*

Os limites laterais dos dois espaços aéreos estão especificados nas cartas de rota (*Enroute Chart - ERC*), que são cartas de navegação utilizadas para localização e direcionamento dos pilotos.

## 2.5 Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo

O serviço de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management - ATFM*) realiza estudos que possam indicar uma expectativa de sobrecarga na infra-estrutura, aeronáutica ou aeroportuária, instalada. Ele é implementado quando se excede essa capacidade da infra-estrutura, ativando procedimentos de ajuste que assegurem um fluxo ótimo de tráfego aéreo para as áreas com tráfego excessivo (Souza et al., 2008).

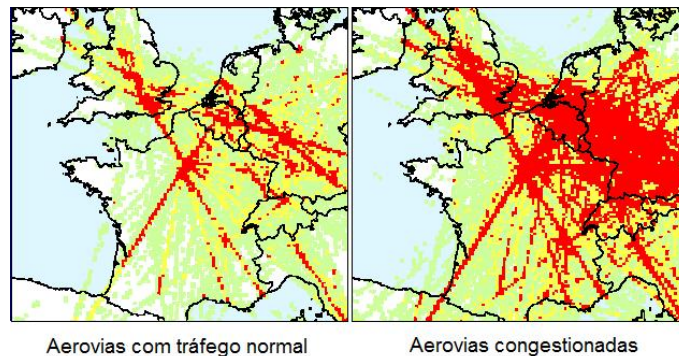


Figura 2.5: *Foco do serviço de ATFM, adaptado de (Dib, 2004)*

É possível verificar por meio da figura 2.5, uma representação gráfica de um setor, que é um espaço bem delimitado no cenário aéreo, com uma quantidade de aeronaves acima do limite especificado, caracterizando um congestionamento.

Portanto, podemos caracterizar que o principal objetivo do ATFM consiste em aplicar medidas de gerenciamento para a regulação do fluxo de aeronaves. Para a definição das ações a serem aplicadas, o ATFM leva em conta três fases de planejamento: a estratégica, a pré-tática e a de operações táticas.

- *Planejamento Estratégico* - consiste na análise, com mais de vinte e quatro horas de antecedência, da relação capacidade/demanda do cenário aéreo, para um determinado momento, bem como, o conjunto de ações necessárias para se resolverem os possíveis congestionamentos. No Brasil, esse planejamento é desenvolvido pelo CGNA, com o apoio das células de fluxo denominadas CINDACTA, onde as ações a serem tomadas são coordenadas entre os prestadores de serviços aeroportuários e os operadores de aeronaves, envolvidos em cada um dos eventos prognosticados.
- *Planejamento Pré-Tático* - este planejamento tem início de 24 horas até 2 horas antes da utilização do espaço aéreo e considera alterações na infra-estrutura aeronáutica e aeroportuária, nas condições meteorológicas e na demanda do tráfego aéreo.
- *Planejamento Tático* - consiste no planejamento das medidas necessárias, dentro de um horizonte de 2 horas até a operação considerada, bem como durante a efetiva utilização do espaço aéreo, onde se avalia a possibilidade de ocorrência de eventos, diante de situações imprevisíveis (condições meteorológicas, falhas de equipamentos, etc). As ações são aplicadas pelas células



de gerenciamento de fluxo e pelo controle de tráfego aéreo, que monitoram a evolução na situação do tráfego aéreo, para garantir que as medidas aplicadas tenham os efeitos desejados (Rolim et al., 2004), (Crespo et al., 2007).

## 2.6 Serviços de Tráfego Aéreo

Os Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Service* - ATS) possibilitam a interação entre o operador de um órgão de tráfego aéreo e o piloto de uma aeronave, por meio de regras baseadas em uma comunicação breve, feita por expressões padronizadas (DECEA, 2009).

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 vôo, de alerta e serviços de resgate, entre outros.

### 2.6.1 Domínios do Espaço Aéreo

Para a realização do ATS, consideram-se diversos fatores relacionados à segurança e à fluência do tráfego, onde o tipo de serviço a ser executado define o gerenciamento por um órgão ATC específico, que atua sobre determinada área de domínio de vôo.

Segundo (FAA, 2002) *apud* (Dib, 2004), os domínios do espaço aéreo dividem-se em:

- *Domínio de Superfície* - controla o tráfego na superfície dos aeroportos, como as operações de solo, de taxiamento e pistas, monitorando e gerenciando o espaço aéreo compreendido até 5 milhas náuticas do aeroporto.
- *Domínio de Terminal* - controla o tráfego durante as decolagens e pousos, estabelecendo e mantendo as seqüências e a separação das aeronaves, gerenciando o espaço aéreo que se estende até aproximadamente 40 milhas náuticas do aeroporto e abaixo de 10.000 pés de altitude.
- *Domínio Em Rota* - controla o tráfego entre os destinos, realizando-se a inspeção das comunicações com as aeronaves, entre aeronaves e o centro, e com as demais instalações do sistema, como o centro de gerenciamento de fluxo de tráfego.
- *Domínio Oceânico* - controla o tráfego de aeronaves sobre os oceanos e o ártico, diferenciando-se dos vôos providos em terra, porque não há sistema de vigilância para fornecer informações das posição exatas das aeronaves, sendo gerenciado através de posições fornecidas via rádio.

Na figura 2.6 é possível ver uma representação simplificada dos diferentes domínios de vôos, onde cada um é gerenciado por um serviço responsável, através de um órgão de controle que está sempre presente.

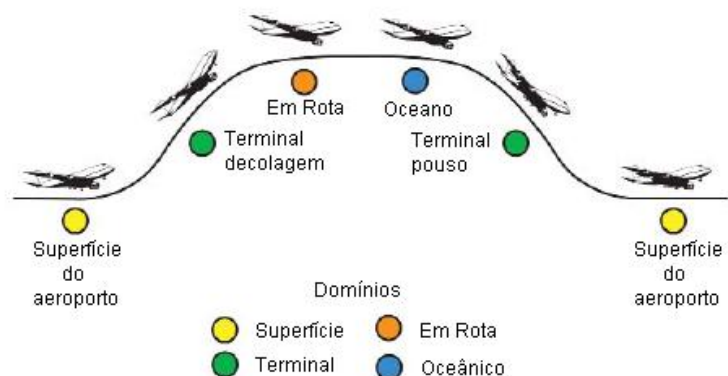


Figura 2.6: *Domínios dos Vôos do Controle de Tráfego Aéreo (Dib, 2004)*

## 2.6.2 Modalidades de Serviço

Segundo (Camargo, 2006), as modalidades dos serviços de controle de tráfego são separadas em:

### Serviços de Alerta

O Serviço de Alerta (*Alert Service - AS*) é prestado por um órgão ATS que tem jurisdição sobre o espaço aéreo em questão, tanto para vôos com procedimento VFR quanto IFR, desde que sejam de conhecimento do ATS.

### Serviços de Informação de Vôo

O Serviço de Informação de Vôo (*Flight Information Service - FIS*) é bastante complexo e abrangente, presta todo o tipo de informação, como as condições meteorológicas, auxílios à navegação, serviços de informação de tráfego aéreo, entre outros, visando a execução segura dos vôos de todas as aeronaves. O FIS é prestado por todos os setores de ATS, desde que este tenha ciência do vôo.

### Serviços de Controle de Tráfego Aéreo

O Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control - ATC*) é um serviço prestado em órgãos de controle, como uma torre de controle de aeródromo (Tower - TWR), onde os controladores de tráfego aéreo são responsáveis pelo controle dos pousos, das decolagens e do deslocamento interno nos aeródromos, como circulação de pessoas e veículos nas áreas de manobra, pistas, etc.

O ATC é considerado o serviço mais importante para o fluxo contínuo, ordenado e seguro dentro do espaço aéreo (DEPV, 1999) *apud* (Camargo, 2006).

Outros exemplos de órgãos de controle são: os Centros de Controle de Área (*Area Control Center - ACC*), onde é prestado o serviço de controle às aeronaves em sobrevôo ou na fase de cruzeiro, que se segue a uma decolagem ou que precede uma aproximação e pouso (aterrissagem), e os Controles de Aproximação (*Approach Control - APP*), que controlam as chegadas e as saídas de uma TMA (Souza et al., 2008).

No Brasil, para se garantir vôos seguros, regulares e eficazes, cita-se os seguintes serviços realizados por Órgãos Operacionais:

- *Serviço de Controle de Aeródromo* - serviço executado pelas Torres de Controle de Aeródromo (*Tower*), figura 2.7 e pelas Estações de Telecomunicações Aeronáuticas (*Rádio*). São responsáveis pelo gerenciamento de aeronaves em domínio de superfície, nas fases de manobra, decolagem, pouso ou sobrevôo de aeródromo, transmitindo informações e autorizações, com o objetivo de garantir um movimento de tráfego seguro, ordenado e rápido no aeroporto e em suas proximidades.



Figura 2.7: *TWR - Torre de Controle - Aeroporto Internacional de Guarulhos*

- *Serviço de Controle de Aproximação* - serviço realizado pelos centros APP, representados na figura 2.8, no domínio da Terminal. São responsáveis por orientar e instruir as aeronaves na execução dos procedimentos de espera, chegada e saída, controlando o tráfego nas fases de aproximação e decolagem de uma TMA ou CTR.



Figura 2.8: *APP - Centro de Controle de Aproximação de Brasília*

- *Serviço de Controle de Área* - serviço executado pelos ACC, no domínio oceânico e em rota, tendo como finalidade a prestação de serviços de supervisão de tráfego aéreo a todas as aeronaves durante a fase de cruzeiro, sob sua área de jurisdição. Os ACC, que podem ser visualizados na figura 2.9, atuam em espaços aéreos controlados de áreas maiores do que as dos controles de aproximação e de aeroporto. Seu principal objetivo é a prevenção de colisões entre aeronaves (controle de separações), a aceleração e a manutenção ordenada do fluxo de tráfego aéreo (autorizações).

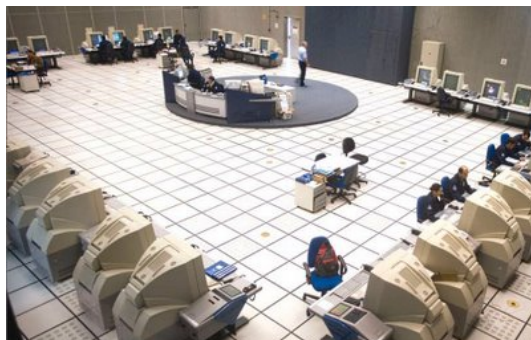


Figura 2.9: ACC - Centro de Controle de Área de Brasília

É importante notar que, operacionalmente, os Centros de Controle de Aproximação e as Torres de Controle dos Aeroportos subordinam-se ao ACC responsável pela área em que estão localizados.

Na figura 2.10, pode-se ver a relação entre as áreas de responsabilidade de cada órgão ATC.

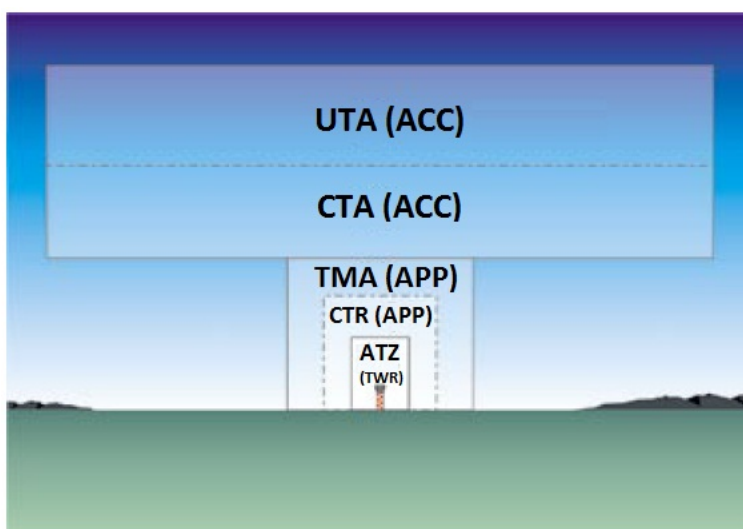


Figura 2.10: Relação entre áreas de responsabilidade de cada órgão

No Brasil, existem cinco Centros de Controle de Área, localizados em Brasília, Curitiba (dois ACC), Recife e Manaus, quarenta e sete Controles de Aproximação (APP) e cinquenta e nove Torres de Controle de Aeródromo (TWR) (DECEA, 2009).

## 2.7 Regiões de Informação de Vôo

Devido ao tamanho e à complexidade das aéreas de controle, elas são fragmentadas em áreas menores, denominadas Regiões de Informação de Vôo (*Flight Information Region - FIR*).

No espaço aéreo brasileiro foram definidas cinco FIR, representados na figura 2.11, cada qual sob responsabilidade de um Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA).



Figura 2.11: *Regiões de Informação de Vôo (FIR) no Brasil (Rolim et al., 2004)*

Para separar as tarefas de gerenciamento entre diversos controladores de tráfego aéreo, foram definidos diversos setores em cada FIR. Os setores são classificados como *S1, S2, S3*, etc. Na figura 2.12, caracterizamos a FIR-BS com seus setores, aerovias e Terminais.

Cada setor do espaço aéreo está sob controle de um único serviço do ATC, e cada setor de cada ATC está sob responsabilidade de um controlador de tráfego aéreo, que pode contar ou não com um assistente. Um assistente pode assumir o controle do tráfego aéreo a qualquer instante.

Os setores pertencentes às aéreas de APP são denominados de Área de Controle de Terminal ou setores APP. Os setores que pertencem às áreas de controle ACC são denominados setores ACC, podendo fazer parte do espaço aéreo superior e/ou inferior (Naufal and Camargo Júnior, 2005) *apud* (Camargo, 2006).

A partir das TMA, localizadas no início e fim das aerovias, é que as aeronaves passam a impactar o espaço aéreo sob responsabilidade dos CINDACTA. Existem também aeronaves que entram e saem dos setores por estas aerovias, não passando necessariamente por terminais.

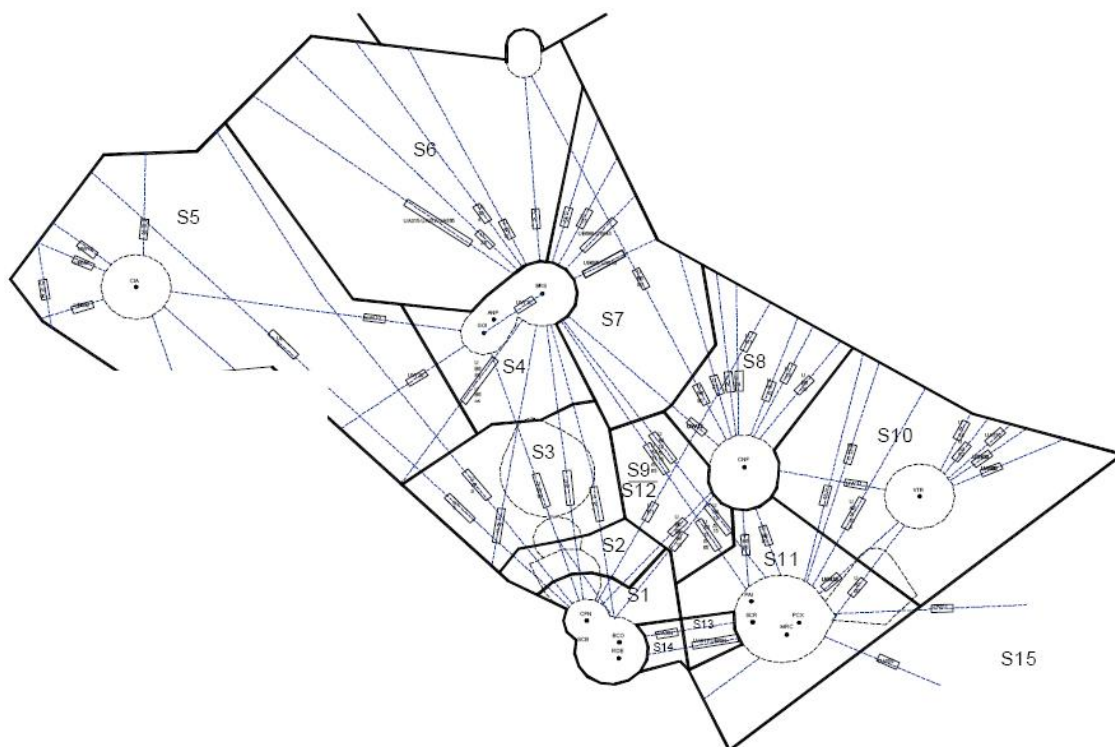


Figura 2.12: Setores, Terminais e aerovias da FIR-BS

Neste contexto, pode-se perceber o quão complexa é esta tarefa de gerenciamento, onde a quantidade de aeronaves por setor influencia diretamente na complexidade do gerenciamento. Ou seja, quanto mais aeronaves trafegando em um mesmo setor, maiores os riscos de segurança envolvidos no processo de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management - ATM*) [(Crespo et al., 2007)].

## 2.8 As Fases de Operação de um Vôo Controlado por um Órgão ATC

As regras de operação de vôo em procedimento IFR, que é adotado pela grande maioria dos vôos comerciais no mundo, seguem padrões internacionais adaptados para atender às necessidades locais do tráfego aéreo.

O procedimento IFR é dividido em fases, onde cada órgão ATC, descritos anteriormente, é responsável por uma ou mais dessas fases.

Em cada fase, o órgão de controle está sempre presente, autorizando, monitorando ou instruindo, para assegurar um vôo eficiente e seguro. Na figura 2.13, segue um mapeamento feito por (Camargo, 2006), de todas as fases de um vôo IFR.










Pré-Vôo	
<p>Para todo vôo IFR deve haver um plano de vôo, normalmente apresentado a um órgão ATC (Controle de Tráfego Aéreo) com certa antecedência ao vôo. O plano de vôo contém informações específicas sobre o vôo, tais como, identificação da aeronave, aeródromo de origem e de destino, horário de partida e previsão do tempo de vôo, equipamentos de segurança e sobrevivência, etc.</p>	
	<p><b>Táxi</b></p> <p>Após receber permissão para acionar os motores, a aeronave recebe autorização do controle de solo para taxiar. O controle de solo é responsável pelo controle desta aeronave até a sua chegada à cabeceira da pista, onde se finda a fase de táxi.</p>
	<p><b>Decolagem</b></p> <p>Ao chegar à cabeceira da pista, a aeronave aguarda da torre de controle (TWR) autorização para decolar. Assim que recebe a ordem, dá-se início a fase de decolagem. Essa fase dura até o vôo cruzar uma dada altitude. Nesse instante, a aeronave deixa o controle TWR e estabelece contato com o controle de aproximação (APP).</p>
	<p><b>Saída do APP</b></p> <p>No instante em que a aeronave finaliza a subida inicial, ainda sobre responsabilidade do APP, a aeronave continua em ascendência, rumo à aerovia definida no plano de vôo. A fase de saída do APP liga a área terminal (TMA) à aerovia.</p>
	<p><b>Em Rota</b></p> <p>Ao sair do APP origem, a aeronave inicia o vôo em cruzeiro pela aerovia escolhida, passando a estar sob vigilância do centro de controle de área (ACC). Quando na aerovia, a aeronave ajusta sua altitude e velocidade. Esta fase pode durar desde alguns minutos até muitas horas, terminando quando é atingido o APP destino.</p>
	<p><b>Aproximação Inicial</b></p> <p>A aproximação é a fase que interliga o vôo em rota à área terminal de destino. Dessa forma, a aeronave deixa o controle do ACC e passa ao controle do APP destino. Caso o terminal esteja congestionado é realizado um processo de fila para pouso, garantindo o espaçamento mínimo entre as aeronaves.</p>
	<p><b>Aproximação Final</b></p> <p>Esta fase se dá quando o vôo cruza uma dada distância e altitude em relação ao aeroporto de destino. Nesta fase, o controle é passado do APP destino para a TWR, que irá autorizar a aeronave a aterrissar. A fase dura até o momento que a aeronave toca a pista de pouso.</p>
	<p><b>Pouso e Táxi</b></p> <p>Após estar em contato com o solo e finalizar o pouso, a aeronave é taxiada rumo ao portão de desembarque. Após deixar a pista e não oferecer risco para os outros vôos em pousos ou decolagens, esta passa a ser controlada pelo controle de solo, que será responsável até o momento da parada da aeronave no portão de desembarque.</p>

Figura 2.13: *As Fases de Operação de um Vôo IFR (Camargo, 2006)*

## 2.9 O Gerenciamento de Tráfego Aéreo no Brasil

O Comando da Aeronáutica do Brasil, para fins dos serviços de tráfego aéreo, adota as Normas e os Métodos Recomendados pela Organização de Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization* - ICAO), adaptadas ao contexto às particularidades do ATFM brasileiro (ICEA, 2007).

A distribuição de deveres e responsabilidades entre as entidades que gerenciam o espaço aéreo brasileiro são muito claras e concisas, tendo caráter legal.

Para esclarecer ao leitor, as diferentes entidades presentes no ATM brasileiro, serão apresentados a seguir, os principais órgãos competentes, que participam do gerenciamento do espaço aéreo.

### 2.9.1 Órgãos Competentes

A tarefa de executar o ATM nacional envolve diferentes órgãos interligados, onde devem ser garantidas a vigilância e o controle do espaço aéreo de forma ininterrupta, 24 horas por dia, 365 dias ao ano. No Brasil, o órgão central que gerencia este serviço é o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

Apesar de sediado no Rio de Janeiro, o DECEA dispõe de cerca de 14 mil funcionários, dentre militares e civis, distribuídos nos 27 estados brasileiros, com qualificações específicas ao desempenho das múltiplas atividades do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB) (DECEA, 2009).

O SISCEAB foi instituído em 1990 sob condução do Comando da Aeronáutica, com a finalidade de integrar os seguintes sistemas:

- Sistema de Proteção ao Vôo (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).

### Departamento de Controle do Espaço Aéreo

O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) foi criado para coordenar o ATM brasileiro, considerando o fato do Brasil ser o principal gerador de tráfego aéreo na América Latina e responsável pela administração de 22 milhões de Km<sup>2</sup>, sendo uma extensa área de cruzamento para as rotas internacionais, cercada por mais de uma dezena de FIR de diferentes países (Dib et al., 2007).

Sua missão envolve o planejamento, gerenciamento e controle das diversas atividades relacionadas à segurança da navegação aérea, ao controle do espaço aéreo, às telecomunicações aeronáuticas e à tecnologia da informação.

Ao DECEA também compete as tarefas de planejar, normatizar, integrar, coordenar, fiscalizar e aprovar a implementação de órgãos, equipamentos e sistemas, bem como, controlar e supervisionar técnica e operacionalmente as organizações, subordinadas ou não, encarregadas das atividades relacionadas ao SISCEAB (DECEA, 2009).



## **O Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea**

O Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) tem por missão a harmonização do gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, do espaço aéreo e das demais atividades relacionadas com a navegação aérea, proporcionando a gestão operacional das ações correntes do SISCEAB e a efetiva supervisão de todos os serviços prestados (CGNA, 2007).

O CGNA conta com todas as Células de Gerenciamento de Fluxo (FMC), usuários, Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária (INFRAERO), para dirigir a operação do sistema de gerenciamento de tráfego. Para isso, utiliza-se de informações meteorológicas e informações sobre inoperâncias no sistema de gerenciamento de tráfego para então executar as seguintes ações conforme necessário.

O CGNA trabalha 24 horas na monitoração das operações aéreas, nas indicações de possíveis congestionamentos nas aerovias, nos registros de informações e indicadores para análise e relatórios, visando à qualidade dos serviços prestados e a máxima eficácia na circulação do tráfego aéreo no Brasil, cujos maiores beneficiários são as empresas aéreas, os passageiros e a aviação em geral (Dib et al., 2007).

Sua atuação se dá na fase do planejamento estratégico dos vôos regulares, e taticamente, durante as operações diárias, buscando o balanceamento entre demanda e capacidade da infra-estrutura aeronáutica, a fim de garantir a segurança das operações, a regularidade e a pontualidade dos vôos, sem espera no solo ou no ar (Souza et al., 2008).

Para se executar tais tarefas, o CGNA conta com um complexo relacionamento entre diversos órgãos de controle e gerenciamento, recebendo e fornecendo informações relevantes ao serviço ATM.

Conforme (CGNA, 2007), este deverá, juntamente com as FMC, usuários, ANAC e INFRAERO, utilizando-se das informações meteorológicas e das informações sobre inoperâncias, implementar, conforme necessário:

1. programas nacionais de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo;
2. monitorar e analisar os componentes do SISCEAB e as condições meteorológicas, verificando impactos potenciais;
3. ser o ponto focal para regulação diária das funções de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo;
4. determinar quando a capacidade do SISCEAB será impactada a ponto de demandar a implementação de um procedimento de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo;
5. implementar procedimentos nacionais de ATFM, quando necessário, para ordenar o fluxo do tráfego aéreo no SISCEAB;
6. recomendar e aprovar alternativas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, quando procedimentos nacionais não forem adequados;

7. monitorar a efetividade dos procedimentos de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo aplicados no SISCEAB, modificando-os ou cancelando-os quando necessário;
8. avaliar a propriedade da aplicação dos procedimentos de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo entre os órgãos de controle, tendo ascendência operacional para arbitrar o procedimento mais adequado;
9. definir, por um período de tempo especificado, os valores das capacidades praticadas de aeroportos ou de setores ATC, em função da disponibilidade de elementos de suas infra-estruturas instaladas;
10. emitir, com a antecedência devida, documentos relativos á declaração de aeroportos coordenados e de aeroportos monitorados;
11. alocar os *Slots* de Controle de Tráfego Aéreo (Slots ATC) para os aeroportos coordenados e/ou monitorados;
12. divulgar os *Slots* ATC alocados relativos aos aeroportos coordenados para as Salas de Serviço de Informação Aeronáutica (*Aeronautical Information Service* - AIS) e TWR daqueles aeroportos;
13. controlar o uso dos *Slots* ATC alocados nos aeroportos coordenados e monitorados.

Em suma, o CGNA deve ser o ponto central da regulação diária das funções de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. Na figura 2.14 está resumido o seu relacionamento com outros órgãos ATC:

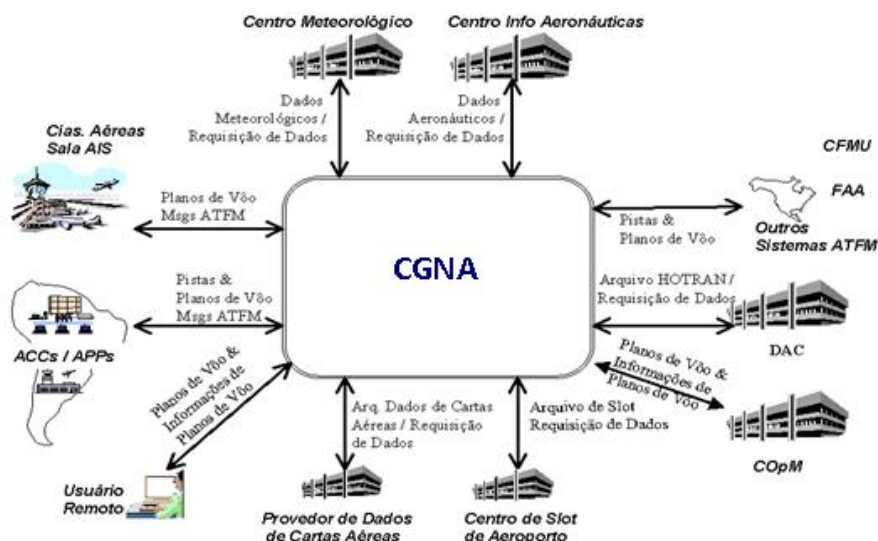


Figura 2.14: *Relacionamento Funcional Sistêmico do CGNA (Dib, 2004)*

## **Órgãos de Meteorologia**

São órgãos que devem fornecer ao CGNA ou as FMC, quando solicitados, dados de previsão e/ou de observação dos fenômenos meteorológicos referentes às respectivas áreas de jurisdição.

## **Salas de Serviço de Informação Aeronáutica**

Ao receber um plano de voo envolvendo um aeroporto coordenado, verificar a existência do código referente ao *Slot* ATC alocado. Caso não exista o código, o procedimento previsto para o *Slot* ATC de oportunidade deverá ser seguido, respeitando as regras pré-estabelecidas.

## **Órgãos de Controle de Tráfego Aéreo**

Devem fornecer ao CGNA ou as 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 de análise de demanda. Elas coordenam inclusive as aplicações das medidas táticas de gerenciamento de fluxo.

## **Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo**

O DECEA gerencia o espaço aéreo do Brasil através de seus múltiplos órgãos Regionais, destacando-se os Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA), elos permanentes do SISDACTA que têm a incumbência de manter seguro e confiável o fluxo do tráfego aéreo nas áreas sob sua jurisdição.

A cada CINDACTA cabe a responsabilidade de gerenciar o tráfego de uma FIR, tendo como objetivo prestar serviços de gerenciamento de tráfego aéreo, defesa aérea, informações aeronáuticas, meteorologia aeronáutica, telecomunicações aeronáuticas e busca e salvamento.

No Brasil, a execução do controle de tráfego aéreo tático de cada região de informação de voo (FIR) é realizado na sala ACC do seu respectivo CINDACTA. Dentre as tarefas principais de um CINDACTA, podem ser citados:

- avaliar e autorizar os Planos de Voo enviados;
- manter as separações mínimas estabelecidas entre as aeronaves, assim como os níveis de voo corretos;
- disciplinar, acelerar e manter ordenado as aeronaves que afetam o fluxo do tráfego aéreo;
- executar medidas restritivas adequadas ao controle de possíveis congestionamentos.

Também cabe aos CINDACTAS, informar ao CGNA os eventos sazonais que possam alterar a demanda de tráfego aéreo que venham a comprometer a circulação aérea em geral. Na figura 2.15, representamos as FIRs sob responsabilidade dos CINDACTAS:

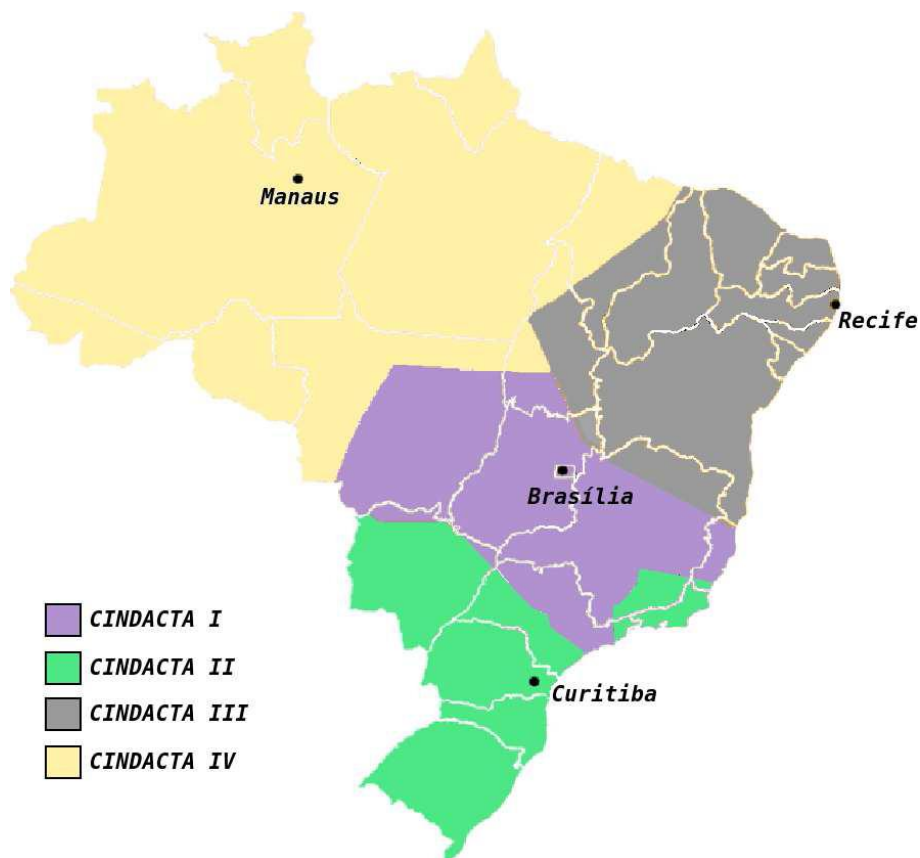


Figura 2.15: Regiões de Informação de Vôo sob responsabilidade dos CINDACTAs (Ribeiro e Ribeiro, 2008)

Cada FIR está relacionada a um CINDACTA como segue:

- *CINDACTA I* - controla o tráfego aéreo na *FIR Brasília (FIR-BS)*;
- *CINDACTA II* - controla o tráfego aéreo na *FIR Curitiba (FIR-CW)*;
- *CINDACTA III* - controla o tráfego aéreo na *FIR Recife (FIR-RE)* e a *FIR Atlântico (FIR-AO)*;
- *CINDACTA IV* - controla o tráfego aéreo na *FIR Amazônica (FIR-AZ)*.

Este trabalho detém seu foco no fluxo de tráfego aéreo da FIR Brasília, também conhecida como FIR-BS, sob responsabilidade do CINDACTA I.

Sediado em Brasília-DF, o CINDACTA I foi o primeiro Centro do Sistema de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (SISDACTA) a ser instalado. Com jurisdição sobre o quadrilátero formado pelos aeroportos do Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte e Brasília, o CINDACTA I comporta cerca de 50% do fluxo de tráfego aéreo no Brasil.

Os demais CINDACTAs, II, III e IV, estão sediados em Curitiba-PR, Recife-PE e Manaus-AM, respectivamente.

## 2.10 Controladores de Tráfego Aéreo

O controlador de tráfego aéreo é o profissional responsável pelo gerenciamento do tráfego aéreo nos aeroportos, áreas de aproximação e espaço aéreo superior. Este trabalho é realizado através do controle de separações mínimas e seguras entre as aeronaves, e uma ordenação do tráfego aéreo em todo o espaço controlado (ICEA, 2007).

Segundo (Ontiveros, 2003) *apud* (Camargo, 2006), alguns autores consideram que, na realidade, o controlador de tráfego aéreo tem o papel de um guarda do tráfego ou do trânsito aéreo. O autor ainda se refere ao trabalho desempenhado pelos controladores de tráfego aéreo como único, e em nenhuma outra profissão há concentração e responsabilidade semelhantes sobre uma única pessoa.

Para exercer todas as suas atribuições, é necessário que esses profissionais possuam grandes habilidades cognitivas, tais como percepção espacial, grande processamento de informações em pouco espaço de tempo e tomada de decisões em tempo hábil. Todas essas atividades tornam a profissão extremamente desgastante, impondo altos níveis de estresse (Weigang et al., 2008).

Outros fatores que afetam os profissionais do controle de tráfego aéreo e contribuem para o aumento do estresse estão relacionados aos novos processos de trabalho. Esses processos são conseqüências do aumento do número de vôos e do número de passageiros, do aumento da velocidade das aeronaves e da necessidade de constantes adaptações aos novos sistemas automatizados (Araújo, 2000) *apud* (Camargo, 2006).

A execução de seu serviço é feita em terra, orientando aeronaves no ar e/ou no solo, buscando propiciar um fluxo de tráfego seguro, ordenado e rápido. Esses profissionais provêm indicações e autorizações de vôo, de acordo com as características operacionais das aeronaves e as condições de tráfego em determinado momento.

Nos centros de controle, os controladores de tráfego aéreo utilizam regras e padrões definidos e aprovados por entidades aeronáuticas nacionais e internacionais, que regulamentam a circulação do tráfego aéreo. Os serviços realizados normalmente incluem autorizações sobre mudanças de rota, mudanças de altitude e/ou velocidade, entre outras, devendo os pilotos das aeronaves cumprirem as instruções recebidas.

A resolução de conflitos também é uma tarefa essencial neste trabalho, como situações de congestionamento dos setores. Isto, além de se tornar um fator de sobrecarga aos controladores devido ao aumento da utilização do espaço aéreo nos últimos anos, é um fator de grande risco para os usuários do transporte (Dib et al., 2007), (Weigang et al., 2008), (Souza et al., 2008).

Para resolver estas situações, medidas de restrição são aplicadas às aeronaves que irão decolar, pousar ou que estão em translado entre aeroportos. Estas medidas visam o controle de quantidade e a harmonização do fluxo de aeronaves nas aerovias, atendendo às prescrições regulamentares que determinam por exemplo, um limite superior no número de aeronaves que podem ser gerenciadas pelos controladores (principal e auxiliar).

Atualmente, 12 aeronaves é quantidade que gera o alerta de congestionamento, e 14, o alerta de saturação do setor, sendo estas, situações extremas que devem ser evitadas por meio de análises e relatórios de fluxo feitas com antecedência pelo CGNA, e das ações empregadas pelos controladores.

## 2.11 Medidas Restritivas

Segundo (Crespo et al., 2007), as medidas restritivas escolhidas têm severo impacto sobre todas as atividades operacionais e aeroportuárias, onde a escolha e a dosagem das técnicas a serem aplicadas na restrição do fluxo são estabelecidas de forma empírica e condicionadas à experiência dos controladores.

Estas medidas de gerenciamento de fluxo de tráfego poderão alcançar as aeronaves no solo ou em vôo. Quando for necessária a adoção de medidas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, poderão ser aplicados, em adequação a cada situação, um ou mais dos seguintes procedimentos:

- redução de velocidade
- espera em solo (*Ground Holding Problem* - GHP)
- espera em ar (*Airborne Holding Problem* - AHP)
- rota alternativa (*Reroute*)
- vetoração para atrasos em rota;
- pouso e espera em aeródromos intermediários.

As medidas de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo não deverão atingir as aeronaves nas seguintes situações:

- em emergência;
- em missão de defesa aeroespacial;
- em operação militar (missão de guerra ou de segurança interna);
- transportando ou destinada a transportar enfermo ou lesionado em estado grave, que necessite de assistência médica urgente, ou órgãos vitais para transplante humano;
- em missão de Busca e Salvamento;
- transportando Chefes de Estado ou de Governo;
- em operação militar (manobra militar);
- Aeronaves em Missão de Inspeção em Vôo.

## 2.12 Os Sistemas Utilizados no Controle de Tráfego Aéreo Brasileiro

Para auxiliar os controladores de voo e supervisores na tarefa de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo surgiram os sistemas ATFM (*Air Traffic Flow Management*).

No Brasil, o sistema que está atualmente em uso foi desenvolvido pela Atech Tecnologias Críticas. As características deste Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo (SYNCROMAX) incluem ferramentas de análise baseadas em estudos estatísticos e previsões que auxiliam a execução do ATFM no espaço aéreo das FIR (Staniscia and Filho, 2008).

Com base nas informações geradas pelo SYNCROMAX, os controladores conseguem determinar as ações a serem tomadas atendendo cenários estratégicos, táticos e operacionais, em um espaço de quinze horas antes das decolagens (Souza et al., 2008).

Estes cenários são compostos por informações referentes aos planos de voo RPL cadastrados no CGNA, no Rio de Janeiro, onde o SYNCROMAX está localizado.

Também está em operação nos CINDACTA, o Sistema de Tratamento e Visualização de Radar (STVD). Este sistema utiliza as informações provenientes dos radares, dos planos de voo FPL e RPL do SYNCROMAX para fornecer um ferramental automatizado dedicado a auxiliar os controladores (DECEA, 2009).

O STVD, disponibilizado através de terminais conhecidos como Estações X-4000, é configurado para mapear um setor da FIR disponibilizando um grande número de informações aos controladores. Seu apoio ao gerenciamento se dá no controle do espaço aéreo brasileiro para vôos civis e nas operações aéreas militares, integrando o Centro de Operações Militares (STVD - CopM1) e o Centro de Controle de Área (STVD - ACC-BS).

Na figura 2.16, verifica-se dois controladores trabalhando em uma Estação X-4000. Estas estações atuam como uma interface entre os controladores e as informações das aeronaves em vôo, disponibilizando de maneira amigável informações seguras e precisas referentes a cada aeronave de responsabilidade do seu setor.



Figura 2.16: Controladores e a estação X-4000

Abaixo, são citadas algumas das funcionalidades providas pelo STVD:

- tratamento das informações e imagens obtidas pelos radares da FIR-BS;
- gerenciamento das informações relativas aos planos de vôo, elaborados sempre quando da ocorrência de uma movimentação aeronáutica;
- supervisão dos postos operacionais do ACC-BS e do COpM1;
- armazenamento das informações obtidas por meio de radar e dos planos de vôo, para que seja possível nova análise posterior, se necessária.

As informações disponibilizadas pelo STVD e o SYNCROMAX abrangem a respectiva área de gerenciamento, em formato gráfico, a análise do desequilíbrio entre capacidade e demanda no uso do espaço aéreo, os dados relativos aos planos de vôos para planejamento estratégico, a centralização do planejamento desses planos e a posterior distribuição aos centros regionais (Atech, 2009).

## 2.13 Descrição do Problema

O controle de tráfego aéreo possui processos tecnológicos de alto risco, nos quais a ocorrência de falhas pode culminar em acidentes. Um acidente em um desses ambientes tem como consequência um impacto considerável, pondo em risco muitas vidas humanas (Araújo, 2000) *apud* (Camargo, 2006).

Porém, na visão de alguns autores, não há dúvidas quanto à importância dos controladores de tráfego para a confiabilidade e segurança de um sistema no qual as tomadas de decisões finais e em tempo real devem conduzir a uma situação segura pois estão relacionadas a vidas humanas.

Entretanto, Crespo et al. (2007) nos alertam que os sistemas ATFM atualmente utilizados, não dispõem de ferramentas para o gerenciamento e a sincronização do fluxo aéreo no período de planejamento tático, ou seja, referente às 2 horas que antecedem os vôos, cabendo a responsabilidade desta análise e soluções de conflito por meio de medidas restritivas, aos controladores e seu supervisor.

No entanto, análises e decisões tomadas em um ambiente tão complexo de informações e com alto grau de periculosidade por conta dos riscos de segurança envolvidos, sem o uso de uma ferramenta de apoio adequada acabam por sobrecarregar esses profissionais, levando normalmente a *stress* e fadiga mental (Weigang et al., 2008).

Assim, pode-se verificar que a área de ATFM atual, apesar de já apresentar tecnologias satisfatórias para o gerenciamento do tráfego aéreo, ainda carece de evolução em determinados problemas (Dib et al., 2007).

O problema foco deste trabalho baseia-se no fato de que, diante de uma situação de congestionamento, o controlador de vôo não possui ferramentas necessárias para se verificar o impacto causado pela medida restritiva adotada, durante a fase de Planejamento Tático.

As medidas restritivas tomadas atualmente objetivam apenas reduzir ou eliminar os congestionamentos, sem considerar os impactos causados, referentes a



diversos fatores e entidades envolvidas no processo de transporte aéreo, como passageiros, aeronaves, companhias aéreas e aeroportos.

Portanto, este trabalho procura dar suporte à tomada de decisão dos órgãos ATC, durante a fase de Planejamento Tático, através de uma ferramenta que sugira, em situações de congestionamento, a melhor medida restritiva a ser aplicada, levando em conta fatores como custos financeiros e equidade na distribuição das medidas restritivas aplicadas, baseadas no problema da espera em solo (GHP).

# Capítulo 3

## Trabalhos Relacionados

Nos últimos anos, é possível ver que a preocupação com os problemas relacionados ao aumento do tráfego aéreo e a importância da segurança envolvida no seu gerenciamento foram e ainda são objetos de muitos trabalhos na área de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management - ATM*).

Por meio dos trabalhos de (Stoltz and KY, 2001) e (Stoltz and Guerreau, 2002), verifica-se que gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo constitui um tipo de problema cuja solução envolve a sincronização do tráfego em tempo real. Para atingir este objetivo, utilizando-se técnicas de Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence - AI*), abordagens de programação inteira, sistemas especialistas, multiagentes e distribuídos, foram propostos por Weigang (1994), Bonzano et al. (1996), Weigang et al. (1997), Bonzano et al. (1996), Silva (2001), Dib (2004), Weigang et al. (2008), Tumer and Agogino (2008), Wolfe et al. (2008) e Bertsimas and Gupta (2009), entre outros.

Focando as tecnologias utilizadas na metodologia proposta neste trabalho, este capítulo dará ao leitor, uma visão geral de algumas dessas pesquisas e artigos.

O objetivo é propiciar uma melhor compreensão do desenvolvimento da Tecnologia da Informação (TI) e da AI, aplicados ao contexto do Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management - ATFM*).

### 3.1 Abordagens em Sistemas Especialistas

#### 3.1.1 Sistema Especialista para Gerenciamento de Tráfego Aéreo

Em 1994, por meio de sua tese de doutorado, defendida no Instituto Tecnológico da Aeronáutica, (Weigang, 1994) apresentou um sistema especialista baseado em conhecimento projetado para o problema de ATFM.

Este trabalho, com o título original *Knowledge-based system for air traffic flow management: timetable rescheduling and centralized flow control*, executa modificações nas tabelas de horários de vôos, reescalando-as e reduzindo a sobrecarga em aeroportos durante horários de pico.

O protótipo do sistema trabalhava ininterruptamente, prevendo o local, o horário e a magnitude do congestionamento, possuindo uma base de conhecimento pro-

gramada com recursos do paradigma de programação lógica, contando com cerca de 196 predicados.

O desenvolvimento da base de dados e das regras do sistema especialista foi implementado em um ambiente centralizado, onde o processamento dos dados referentes as alterações ocorridas era executado pela ordem de chegada. Após a resolução dos conflitos identificados, o sistema produz uma nova tabela de horários com os vôos suavizados.

Como a massa de testes incluía dados dos principais aeroportos brasileiros, este fato apontou problemas de desempenho próprios da arquitetura centralizada, apresentando sobrecarga do ponto central de processamento.

Segundo (Souza, 2008), outro fato que influenciou o mau desempenho do sistema, foi a velocidade do *hardware* da época, associado ao uso de uma linguagem interpretada (*Prolog*).

## **3.2 Abordagem Utilizando Interação Homem-Máquina**

### **3.2.1 Rumo a um Modelo de Predição de Taxas de Erro Humano em Sistemas Interativos**

Com o título original de *Towards model based prediction of human error rates in interactive systems*, LeadBetter e outros, em 2001, propuseram um método para determinar a probabilidade de ocorrência de erros em operações de Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control - ATC*).

A motivação do trabalho considera o crescimento gradual da utilização de computadores em tarefas consideradas críticas, como o ATC. Uma tarefa crítica pode ser caracterizada como uma operação onde existe a real possibilidade de potenciais danos, ferimentos ou perda de vidas por falhas associadas à operação do mesmo.

Desta forma, a evolução e aprimoramento da metodologia de desenvolvimento da interface entre o operador humano e o computador que automatiza a tarefa crítica, torna-se uma atividade de grande importância.

Assim, (Leadbetter et al., 2000) conclui que a execução do desenvolvimento da interface dos sistemas críticos deve ser realizada de forma mais inteligente, implementando melhorias nessa interação para tornar os computadores mais usáveis e receptivos às necessidades das pessoas, sempre buscando reduzir a probabilidade de erros.

O modelo de Interação Homem-Máquina (*Human-Computer Interaction - HCI*) desenvolvido em seu trabalho baseia-se na combinação da notação *Z* com a Notação de Ação do Usuário (*User Action Notation - UAN*). Abaixo faremos um breve comentário sobre cada uma delas.

- *notação Z* - permite a modelagem de sistemas baseados em estado, através da projeção de nomes de atributos. Neste trabalho é utilizada para distinguir os valores anteriores e posteriores a atualização de um atributo.
- *Notação de Ação do Usuário (User Action Notation - UAN)* - caracteriza uma simplificação para descrever o comportamento do usuário com a interface,

quando eles executam uma tarefa juntos. A UAN provê símbolos para esta interação (como movimentar e clicar o mouse), informando o *feedback* na interface (monitor). O modelo proposto atribui símbolos a aeronaves, seleções e indicações de avisos em determinadas posições da tela.

Através das ferramentas indicadas acima, o estudo de caso foi modelado em três abordagens:

1. O sistema ATC - modelo de simulação dos setores aéreos, com dados que são apresentados graficamente ao controlador de tráfego aéreo via módulo HCI ATC;
2. A Interface Humano-Computador ATC - módulo responsável pela visualização dos dados e captura das ações tomadas, indicando os possíveis erros detectados, decorrentes da HCI modelada;
3. O modelo Operador - modelagem de um operador formal, baseado em um processo cognitivo de alto nível do operador ATC real, simplificando os mecanismos de baixo nível da memória humana. É integrado ao modelo ATC HCI para identificar fontes de erro nas ações e indicar as ferramentas HCI correspondente que minimizem esses erros.

Neste trabalho, o modelo HCI desenvolvido combina a teoria atual de causas psicológicas de erros humanos com métodos formais de modelagem HCI.

Leadbetter et al. (2000) caracterizam como erros humanos, os erros ocasionados pela percepção, gerados por ações relacionados a tarefas cognitivas, tendo relação direta com o HCI.

No modelo cognitivo, existe um potencial para erros que ocorrem em cada tarefa e/ou sub-tarefa. Para mapear possíveis erros em uma tarefa cognitiva, é associada uma taxa de erro base. Esta taxa de erro base é uma probabilidade que define a possibilidade da função de entrada/saída produzir uma das saídas associadas com o modelo de erro criado para a entrada da tarefa, se todos os fatores externos são ignorados.

Na figura 3.1 podemos ver uma simplificação do modelo proposto.

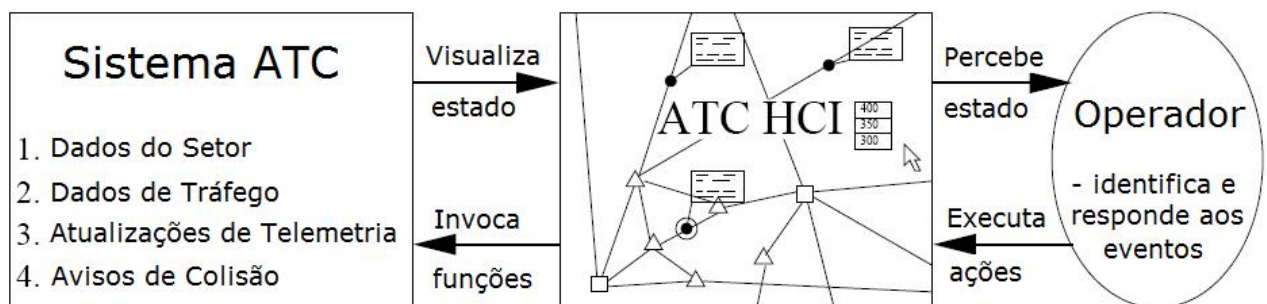


Figura 3.1: *Relacionamento entre os modelos Sistema, HCI e Operador. Adaptado de (LeadBetter et al., 2000)*

No trabalho proposto foi utilizado:

- Demanda e características de tarefas (*Task demands and characteristics*): frequência, sobrecarga de trabalho, duração, interação com outras tarefas, percepção, física, memória, atenção requerida, vigilância requerida.
- Introduções e procedimentos (*Introductions and procedures*): Acurácia, clareza, nível de detalhe, significado, legibilidade, formato, seleção e localização, revisão.
- Ambiente (*Environment*): temperatura, umidade, barulho, vibração, iluminação, espaço de trabalho, restrição de movimento, controle do ambiente do operador.
- Stress (*Stresses*): pressão do tempo, carga de trabalho, fadiga, monotonia, isolamento, distração, incentivo de trabalho por turnos.
- Individual (*Individual*): capacidade, treinamento e experiência, habilidade e conhecimento, personalidade, condições físicas, atitudes, motivação, percepção de risco.
- Sócio-técnico (*Socio-technical*): adequação do pessoal, horas de trabalho e pausas, recursos disponíveis, pressão social, conflitos, estrutura da equipe, comunicação, papéis e responsabilidades, recompensas e benefícios, atitude em relação à segurança.
- Visores e controles (*Displays and controls*): compatibilidade, facilidade de manuseio, confiança, feedback, eficiência, localização, legibilidade, identificação, distinção.

Fatores externos tem um efeito multiplicativo nas taxas base de erro associadas com os diferentes modos de erro de uma tarefa. Isto é similar a abordagem de muitos métodos de quantificação de erro humano existentes, como *Technique for Human Error Rate Prediction* (THERP).

Este indicador de taxa de erro base é utilizado para a acurácia quantitativa da taxa e para a validação por comparação e calibrar o HCI em testes experimentais.

### **3.2.2 Melhorando Displays de Tráfego Aéreo Através de Sugestões de Percepção**

Em 2008, Palmer e outros, publicaram *Enhancing Air Traffic Displays via Perceptual Cues*, com uma proposta de avaliações e experimentos em representações gráficas de aeronaves nos *displays* de simuladores de ATC.

Sua contribuição está na adição de sugestões do tamanho da representação da aeronave e do contraste às exposições do ATC, podendo oferecer benefícios específicos na detecção de conflitos no fluxo do tráfego dos vôos.

O objetivo do trabalho de Palmer et al. (2008) está na diminuição do tempo de resposta em se detectar conflitos entre aeronaves, com tratamentos diferenciados para a altitude e as distâncias de separação dos aviões.

Em uma das experiências, o contraste e as sugestões do tamanho à altitude melhoraram a exatidão em identificar conflitos. Na outra, foi identificado que as

sugestões gráficas para representar a altitude melhoraram a exatidão e reduziu o tempo de busca em se encontrar conflitos, detectando mais facilmente as colisões futuras dos aviões.

Na figura 3.2 podemos ver as propostas de tamanho (*size-cue*) e contraste (*contrast-cue*), em representações diversas.

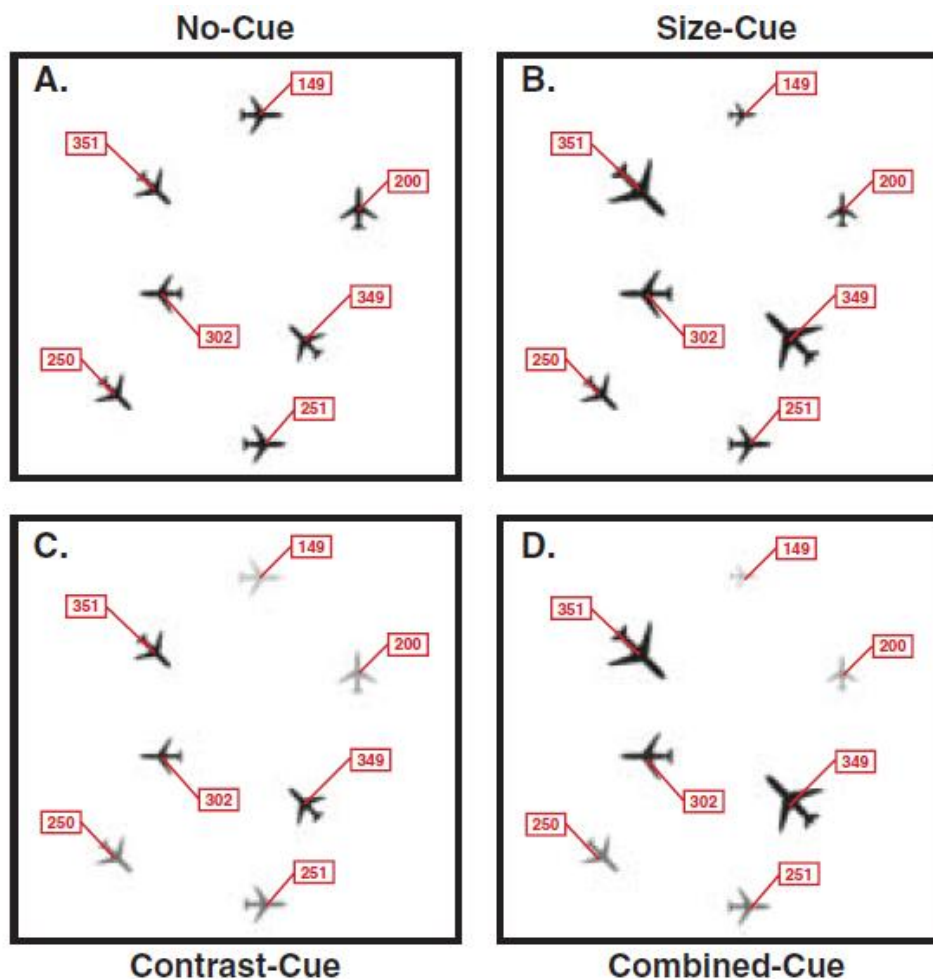


Figura 3.2: Proposta de alteração de display ATC. Adaptado de (Palmer et al., 2008)

A justificativa para os excelentes resultados apresentados, está no fato de que sugestões de imagens baseadas em contraste, podem estimular o sistema visual a efetuar comparações relacionais de forma mais eficientemente. Uma outra justificativa para a qualidade da proposta apresentada, indica que o tamanho de objetos no campo visual está relacionado a processos da percepção de profundidade.

Os autores indicam que a representação gráfica de informações de caráter crítico, por meio de metáforas visuais, e a conseqüente fluência adquirida através de treinamento, podem ser úteis para a concepção ideal de interfaces.

Na conclusão do trabalho, a implementação desta solução é sugerida devido à simplicidade com que pode ser incluída nos sistemas ATFM, pois é muito mais simples alterar a forma de exibição das informações das aeronaves, do que ter que redesenhar as interfaces ATC existentes.

### 3.3 Abordagens em Sistemas Multiagente

#### 3.3.1 Sistema Multiagentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo

O modelo proposto por Marcos Dib em 2004, pode ser definido como um sistema distribuído que atua no auxílio ao ATFM.

O sistema, denominado Sistema Multiagentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFSM-MAS), utiliza tecnologias de inteligência artificial, coordenação de multiagentes (Inteligência Artificial Distribuída - IAD), tecnologia *Web Service*, tecnologia de *Grid Computacional* e de serviços.

O principal objetivo abordado é resolver o problema do ajuste entre os horários de decolagem e pouso das aeronaves, otimizando o fluxo de tráfego aéreo através da previsão de congestionamentos e racionalização da utilização dos recursos em diferentes aeroportos (Dib, 2004).

Em sua modelagem, Dib definiu basicamente três tipos de agentes: agentes Pré-ATC, agentes de Planejamento Tático (Agentes PT) e agentes ATC, os quais atuam em conjunto em um aeroporto. Na figura 3.3, pode-se ver a arquitetura proposta:

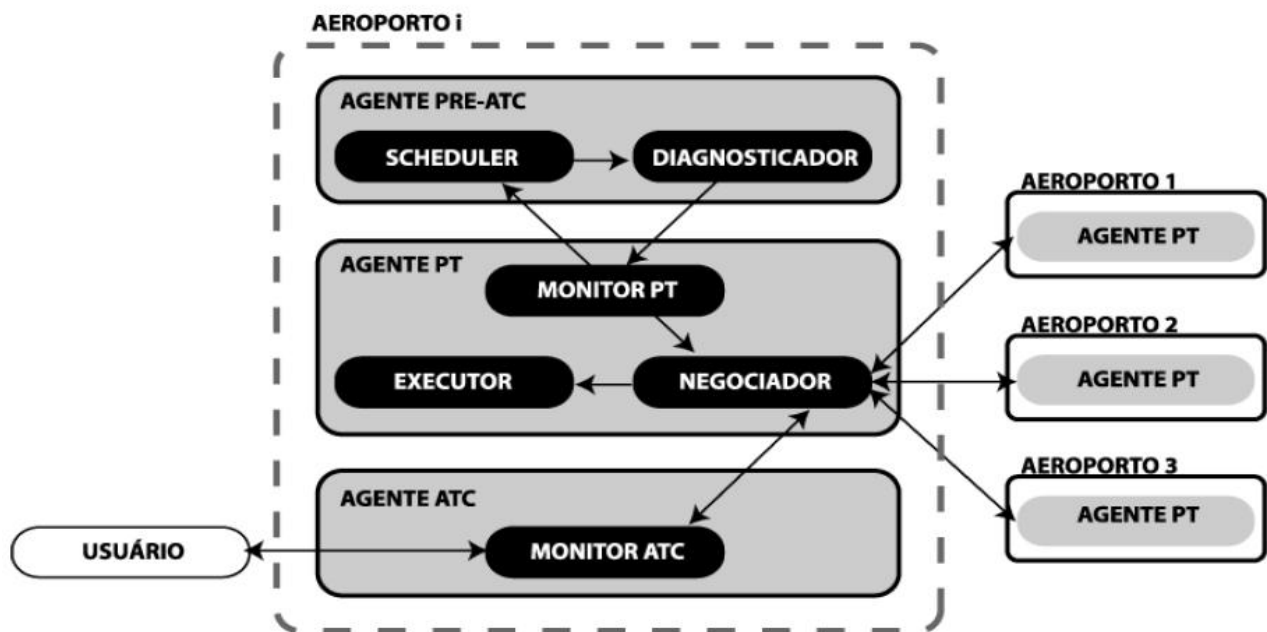


Figura 3.3: Arquitetura dos agentes no ATFSM-MAS (Dib, 2004)

Na execução do ATFM através de técnicas de negociação entre os diferentes agentes de cada aeroporto, cada tipo de agente executa tarefas bem definidas. Abaixo, citamos as funções de cada agente:

- *Agentes Pré-ATC* - gerenciar o fluxo de vôos que chegam e que saem do aeroporto local, mantendo a escala de horários previstos. Têm como módulos

principais o *Scheduler*, que ajusta vôos em conflito maximizando a utilização das pistas, e o Diagnosticador, que realiza a identificação de congestionamentos.

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

A idéia básica de funcionamento da arquitetura do ATFMS-MAS é que, em cada aeroporto local participante do *Grid* de serviços, um agente autônomo monitore a situação do fluxo das aeronaves previstas para pousar e decolar em um futuro próximo. No trabalho ATFMS-MAS, definiu-se duas horas.

Caso o agente detecte a possibilidade de um congestionamento local, este se comunicará com as aeronaves em rota, destinadas a pousar, com as aeronaves previstas para decolarem deste aeroporto e com os aeroportos de origem de vôos causadores de conflitos, para negociação de uma solução.

A solução negociada pode resultar em três tipos de ação:

1. Vôos já em rota no momento da análise: a solução será a retenção no ar, ajustando a velocidade das aeronaves para atender aos novos horários de pouso estabelecidos na negociação;
2. Vôos que ainda não decolaram: a solução será o atraso em solo na origem, negociando um novo horário de decolagem com o agente do aeroporto responsável;
3. Vôos programados para decolarem do aeroporto local: retardamento da decolagem das aeronaves.

Como cada aeroporto possui o mesmo conjunto de agentes, todos os aeroportos do *Grid* de serviços estarão fazendo suas análises e verificações de conflitos ao mesmo tempo, negociando com os demais aeroportos quando necessário.

Para negociar o fluxo de aeronaves para um aeroporto, o modelo utiliza um índice de fluxo e um índice de congestionamento, alocando os recursos do mesmo. Essa quantia abstrata, denominada Padrão de Balanceamento de Aeroporto (PBA), é uma função que envolve o tempo de atraso de cada vôo e um peso (fator de importância) a ele associado (Dib, 2004). Abaixo é descrita a fórmula:



$$PBA(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^n \text{Peso do Atraso}(f_i) \times \text{Minutos de Atraso} / 10 \quad (3.1)$$

Onde:

- $PBA(t_1, t_2)$ : é o Padrão de Balanceamento de Aeroporto entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , indicando a carga do aeroporto
- $n$ : é o número de vôos entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$
- $f_i$ : representa o vôo em análise

O PBA foi escolhido como uma função do tempo de atraso porque, quando um aeroporto está congestionado, alguns vôos são atrasados e a extensão do tempo de atraso é proporcional à severidade do congestionamento. Mas os vôos não têm a mesma importância e o atraso de um vôo pode ter um custo maior do que o atraso de outro.

Assim, através da função  $\text{PesoDoAtraso}(f_i)$ , a fórmula  $PBA(t_1, t_2)$  3.1 é equilibrada quanto a importância distinta dos vôos, tanto para as aterrissagens quanto para as decolagens de cada aeronave.

Em virtude da intenção de minimizar a retenção de aeronaves no ar, simplifiquei a função  $PBA(t_1, t_2)$ , através da *multiplicação* da função  $\text{PesoDoAtraso}(f_i)$  e cada minuto de atraso por um peso.

Como o PBA é calculado para cada aeroporto, ele gera um padrão de balanceamento traduzindo em uma mesma medida a carga de movimentação ou congestionamento. A cada período de tempo, o PBA é calculado localmente para cada aeroporto, indicando que quanto maior o PBA, maior o congestionamento.

Para que cada aeroporto possa trabalhar com uma margem aceitável de congestionamento, foi criado um indicador da quantidade de carga que pode ser absorvida, o *PBA aceitável local*, definido como 1. A situação dos aeroportos com PBA maiores ou iguais ao PBA aceitável local, dispara os respectivos agentes que acionam o *Grid*. Quando os PBAs forem inferiores a 1, indicam que os conflitos podem ser absorvidos localmente.

O sistema ATFMS-MAS implementa a modelagem multiagentes e o *Web services via framework JAVA*, utilizando-se das funcionalidades de Grid Computacional definidas pelo *Open Grid Services Infrastructure - OGSi*, como o uso da ferramenta *Globus Toolkit* (Dib, 2004).

### 3.3.2 Gerenciamento Adaptativo de Fluxo de Tráfego Aéreo: Uma Abordagem de Coordenação Multiagente

Tumer and Agogino, em 2008, propuseram algoritmos de aplicação em coordenação de multiagentes para o gerenciamento de tráfego aéreo, em seu trabalho *Adaptive Management of Air Traffic Flow: A Multiagent Coordination Approach*.

Segundo os autores, uma abordagem multiagente adaptativa se encaixa perfeitamente ao ATFM, uma vez que problemas complexos como a interação entre as aeronaves, aeroportos e controladores de tráfego são naturalmente distribuídos.

A abordagem utiliza o software FACET para simular resultados em sua aplicação. O FACET (*Future ATM Concepts Evaluation Tool*) é um modelo físico baseado no espaço aéreo americano, desenvolvido para modelar o complexo problema do fluxo de tráfego aéreo.

Ele efetua a propagação de trajetórias de vôos propostos no decorrer do tempo. No trabalho proposto, os agentes tomam ações baseadas nas informações sobre os vôos, fornecidas pelo FACET, e devolvem as ações tomadas ao FACET. Através dos resultados produzidos, os agentes avaliam suas próprias ações quanto ao impacto acusado.

A abordagem multiagente proposta é baseada em agentes independentes que tomam ações buscando maximizar uma função de avaliação do sistema.

Como a escolha de aeronaves como agentes deixaria o sistema muito lento, pois são mais de 40.000 aeronaves sobre o espaço americano em um dia, a seleção dos agentes foi feita sobre localizações individuais sobre o solo, conhecidas como fixos (por exemplo, radares). Portanto, cada agente será responsável por qualquer aeronave que esteja transitando sobre seu fixo.

Baseados na definição dos agentes, a seleção do conjunto de ações dos agentes, utilizada pelos autores para que o fixo controle o fluxo de tráfego, foi definida em três métodos:

1. *Miles in Trail* (MIT): Os agentes controlam a distância que as aeronaves têm que manter entre elas enquanto se aproximam de um fixo. Com um alto índice de MIT, menos aeronaves serão capazes de passar por um determinado fixo durante períodos de congestionamento, porque a aeronave terá que desacelerar para manter as distâncias determinadas. Portanto, a configuração de valores MIT altos, pode ser utilizada para reduzir o fluxo de congestionamento de um fixo.
2. *Ground Delays* (espera em solo): um agente deve controlar o quanto uma aeronave que eventualmente passará por um fixo, deve esperar em solo. Impor uma espera em solo causará um atraso em sua chegada até o fixo. Com esta ação, congestionamentos podem ser reduzidos se alguns agentes escolherem a espera em solo e outros não, dispersando o congestionamento. Todavia, note que se todos os agentes escolherem a mesma espera em solo, então o congestionamento vai simplesmente acontecer em um momento mais tarde do tempo.
3. *Rerouting* (rota alternativa): um agente controla as rotas que passam por seu fixo, desviando as aeronaves através de outras rotas, evitando (a princípio) o congestionamento.

Conforme (Sutton and Barto, 1998), os autores assumem que em seu sistema, cada agente terá uma função de recompensa, procurando maximizar o valor desta recompensa utilizando a Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning* - RL).

A cada ciclo, um agente toma uma ação e então recebe um valor de recompensa pelo resultado produzido por esta ação. E então, usa esta função de recompensa para atualizar seu histórico, de forma que ele tome apenas ações, no futuro, de forma a aumentar este valor.

A análise de desempenho do sistema pode ser focada em atrasos e congestionamentos. Os autores propuseram a utilização de uma combinação linear destes dois termos, criando a função de avaliação do sistema, como segue:

$$G(z) = -((1 - \alpha) B(z) + \alpha C(z)) \quad (3.2)$$

Onde  $G(z)$  é uma função do status total do sistema para o estado  $z$ , sendo  $B(z)$ , a penalidade total para atrasos, em minutos, de todas as aeronaves no sistema, e  $C(z)$  o valor total para congestionamentos, que penalizam o estado do sistema quando o número de aeronaves em um setor excede a capacidade máxima definida. A importância relativa destas duas penalidades determinam o valor de  $\alpha$ .

Procurando uma forma de avaliação que possa ser mais sensível aos estados/ações dos agentes, e seja mais alinhada com a recompensa global do sistema, os autores exploraram mais uma função.

$$D_i = G(z) - G(z - z_i + c_i) \quad (3.3)$$

Onde  $z_i$  é o estado do agente  $i$ . Todos os componentes de  $z$  que são afetados pelo agente  $i$  são substituídos por uma constante fixa  $c_i$ . Esta recompensa é chamada de recompensa diferencial, sendo efetiva em permitir a um agente enxergar os impactos de suas próprias ações.

Entretanto,  $D_i$  possui um alto custo computacional, pois depende do cálculo do termo de fator de contagem de  $G(z - z_i + c_i)$ , como por exemplo, a performance do sistema sem o agente, podendo prejudicar o desempenho do sistema.

A terceira função de recompensa é uma estimativa de  $D_i$ , que é mais computacionalmente tratável e exige muito menos chamadas para o simulador FACET (um passo por vez, ao invés de um por agente).

As simulações e testes dos autores apresentam bons resultados, sendo que sua arquitetura tem a vantagem de não criar grandes mudanças na estrutura de gerenciamento de tráfego aéreo atual.

A aprendizagem por reforço também possibilitou a aplicação de diferentes funções de recompensa, possibilitando estudos e ajustes destas e de novas funções.

Como trabalho futuro, os autores estendem seu trabalho em quatro direções:

- explorar novos métodos de estimar a recompensa dos agentes, de forma a acelerar as simulações.
- explorar o impacto de alguns agentes sobre a performance do sistema, quando a ação de um agente restringe a ação de outro agente. Por exemplo, a definição de esperas em solo pode impactar na definição de rotas alternativas, ou em restrições MIT.
- investigar estratégias de desenvolvimento e procurar modificações que teriam maior impacto. Por exemplo, estender a definição de agentes de fixos para setores, aumentando a possibilidade dos agentes controlarem o tráfego aéreo, possibilitando uma maior eficiência na eliminação de congestionamentos.

- em cooperação com especialistas na área de ATFM, investigar diferentes funções de avaliação para o sistema, além dos atrasos e congestionamentos apresentados neste trabalho (função  $G$ ).

### 3.3.3 Uma Simulação Multiagente de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Colaborativo

Em seu trabalho *A Multi-Agent Simulation of Collaborative Air Traffic Flow Management*, Shawn R. Wolfe e outros, em 2008, apresentam os resultados experimentais de um projeto de simulação de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Colaborativo (*Collaborative Traffic Flow Management* - CATFM).

O trabalho apresentado utiliza algumas abordagens estratégicas simples de seleção de rota e gerenciamento de fluxo de tráfego. Seu objetivo principal foi avaliar vantagens e desvantagens de simulações CATFM com uma abordagem mais simples, no espaço aéreo americano.

Enquanto o ATFM geralmente possui um controle mais centralizado, comparado a outras formas de gerenciamento de tráfego, a abordagem CATFM aumenta a troca de informações e distribui alguns elementos tomadores de decisão.

A utilização do CATFM justifica-se pelos resultados presumidos de diminuição da carga de trabalho para os centros de controle, aumento da satisfação das companhias aéreas, e um gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo mais eficiente.

Alguns desafios enfrentados são normais no contexto multiagentes, como o planejamento de um sistema de regras robusto e eficiente, onde as ações dos participantes trabalham de forma a maximizar o objetivo global desejado.

Em seu trabalho, (Wolfe et al., 2008) trabalha com dois tipos de participantes:

- uma entidade de controle de tráfego, que procura maximizar algumas propriedades globais (como a performance do sistema, dada pela fluência segura de aeronaves), e;
- os operadores participantes, que procuram maximizar seus próprios objetivos (como uma aeronave que procura chegar o mais rápido possível ao seu destino, sem se importar com as demais aeronaves).

O sistema foi construído sobre a plataforma de simulação baseada em agentes, conhecida como Brahms.

Brahms é uma ferramenta utilizada para modelar e simular a forma como agentes trabalham e colaboram, descrevendo práticas e processos de trabalho atuais e futuros em organizações baseadas em seres humanos ou não.

A modelagem da simulação CATFM possui dois tipos principais de agentes:

1. Agente TMU (*Traffic Management Unit* - Unidade de Gerenciamento de Tráfego): este agente trabalha como um monitor do espaço aéreo, detectando desbalanceamento entre capacidade e demanda e distribuindo estas informações aos AOCs. Em uma variação simplificada da simulação, um agente TMU deve aceitar ou rejeitar requisições de rotas de vôo efetuadas pelo agente AOC. Em outras variações de simulação, o agente TMU tomará estratégias ótimas ou sub-ótimas.

2. Agente AOC (*Airline Operations Center* - Centro de Operações da Companhia Aérea): os agentes AOC são as interfaces entre as companhias aéreas e as unidades de controle de tráfego, comunicando informações de vôos, alocações, e o valor de vôo de cada aeronave. Também recebem qualquer informação transmitida de um agente TMU. Na variação mais simples da simulação, os agentes AOC selecionam rotas para seus vôos, re-planejando quando estas solicitações de rotas são rejeitadas pela TMU. Em outras variações, os agentes AOC não tem função direta na seleção da rota.

Na figura 3.4 podemos ver a arquitetura do trabalho (Wolfe et al., 2008).

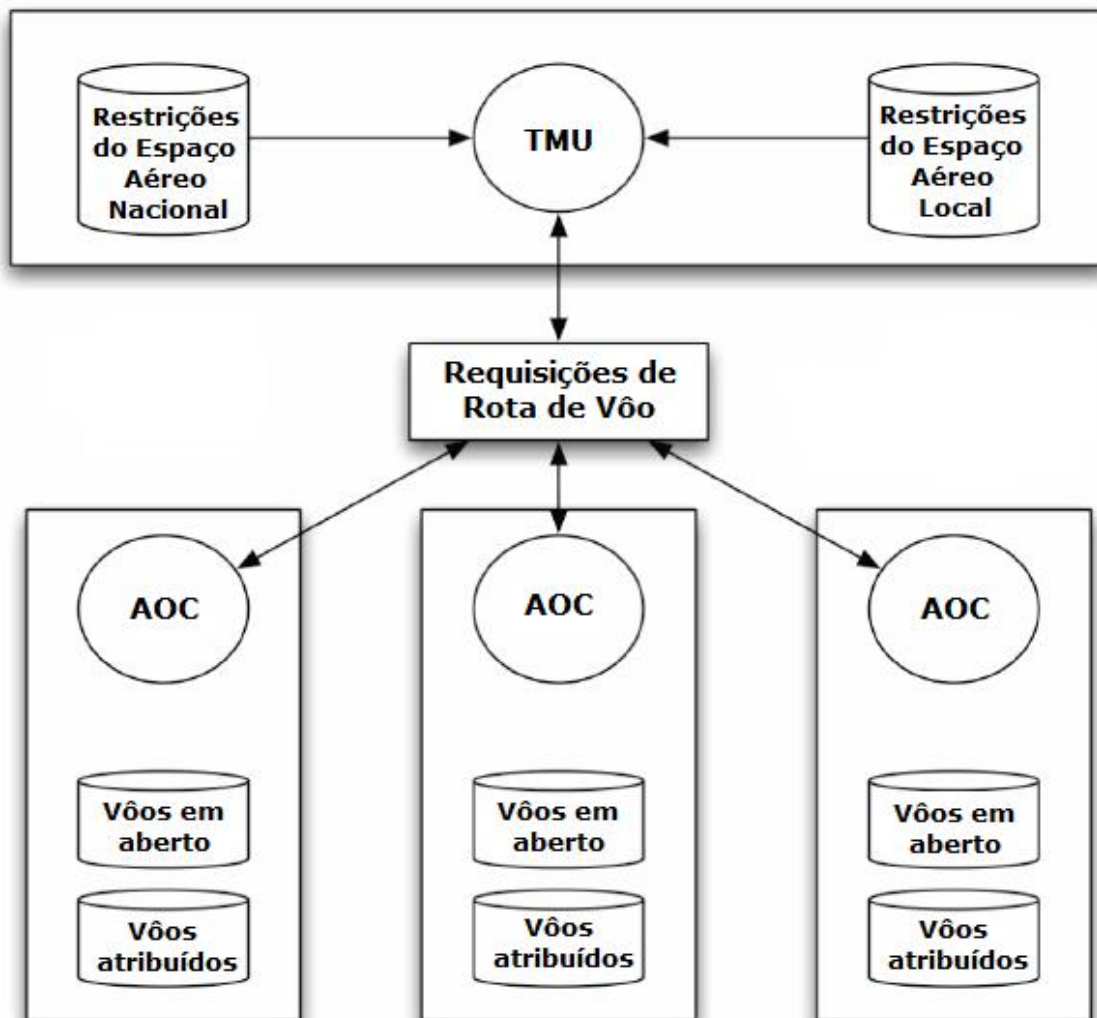


Figura 3.4: *Arquitetura dos agentes TMU e AOC (Wolfe et al., 2008)*

Como função de avaliação para calcular as ações dos agentes, um valor métrico de vôo foi definido, indicando, para cada vôo  $F$ , as seguintes quantificações:

- $p_c$  = passageiros em vôos com conexão
- $p_u$  = passageiros em vôos sem conexão

- $c_c$  = membros da tripulação a bordo em vôos com conexão
- $t_a$  = o tempo de vôo atual de  $F$ , em minutos
- $t_o$  = o tempo ótimo de vôo de  $F$  (na simulação Blue Sky), em minutos

Cada vôo é associado a um *valor de vôo*, que é uma medida heurística de um vôo para uma companhia aérea. Nós definimos  $v_F$ , o valor de vôo de  $F$ , como:

$$v_F = p_u + 3p_c + 5c_c \quad (3.4)$$

Quando  $F$  é associado a uma rota, nós calculamos  $d_F$ , o atraso (*delay*) para o vôo  $F$ , da seguinte forma:

$$d_F = t_a - t_o \quad (3.5)$$

Neste modelo, a demanda de tráfego naturalmente aumenta e diminui no decorrer do dia, então foi assumido que o nível de demanda diminui significativamente depois que a simulação termina. Existem outros fatores causadores de atrasos na prática, mas não foram estudados neste modelo.

Finalmente, buscou-se medir o atraso total de passageiros imputados por um vôo  $F$ , quer através de um atraso imediato ou por meio de atraso de conexões perdidas.

Foi assumido que quando um passageiro em um vôo com conexão está atrasado, na média, aquele passageiro terá uma penalidade de atraso em mais duas horas.

Quando membros da tripulação a bordo em vôos com conexão são atrasados, seu atraso pessoal não é contado (uma vez que eles não são considerados passageiros nesta simulação), mas eles podem atrasar a partida dos vôos de sua conexão, que por sua vez impacta muitos passageiros. Portanto, foi assumido que na média, qualquer atraso em um vôo de um membro de tripulação com conexão resulta em um total de cinco horas de atraso aos passageiros.

Combinando essas considerações com as fórmulas 3.4 e 3.5, calculamos o atraso total em passageiros causados por um vôo  $F$ ,  $d_T$ , em minutos, como :

$$d_T = (p_u * d_F) + (p_c * d_F) + 120p_c + 300c_c \quad (3.6)$$

Os autores indicam quem quando  $d_T$  é igual ao resultado acima, então  $d_F > 0$ . E se  $d_T = 0$ , então  $d_F = 0$ .

De forma a simplificar o ambiente CATFM, os autores redefiniram *capacidade* para ser a propriedade de uma rota, e não de um setor, assumindo que as rotas são independentes.

Através da simulação, capacidade de rota, alocação de vôos e estratégias de agentes não são alteradas. Entretanto, a demanda pela rota é dinâmica em simulações onde agentes escolhem rotas.

Para a análise de resultados sobre a execução do conceito CATFM sobre um modelo tão simplificado, algumas abordagens foram definidas:

- *Blue Sky*: todas as capacidades são infinitas, de forma que cada voo toma uma rota direta. Com esta abordagem, os autores determinaram um limite máximo no desempenho da simulação.
- *Current Operations*: o agente *centro de controle* (TMU) escolhe a rota, alocando aeronaves na melhor rota possível (com baixa ocupação) de forma aleatória, sem verificar o valor de voo.
- *Global Optimum*: o agente *centro de controle* (TMU) escolhe a rota, como na abordagem *Current Operations*, mas ordena os voos conforme seus valores de voo (do maior para o menor). Este algoritmo guloso (*greedy algorithm*) produz o melhor desempenho global para o sistema, de acordo com as métricas no trabalho. Entretanto, isso pode dar preferência em determinadas rotas, para uma companhia aérea, em relação a outras, devido as diferenças na distribuição do valor de voo.
- *Airline Planning*: O agente *companhia aérea* (AOC) escolhe a rota, onde cada agente inicialmente solicita a melhor rota para cada voo, independente da estratégia usada. Depois que o agente TMU distribui o status de todas as rotas, o agente AOC pode escolher uma nova rota para cada voo. Para esta abordagem, foram definidas três estratégias:
  1. Agressiva: um agente AOC configurado com uma estratégia agressiva sempre vai requisitar a melhor rota para cada voo, a cada iteração da simulação;
  2. Moderada: nesta estratégia, o agente AOC vai solicitar a melhor rota para alguns de seus voos de acordo com a situação de ocupação, repetindo uma requisição prévia para os demais voos;
  3. Conservadora: o agente AOC que utiliza esta estratégia vai requerer a pior rota para alguns de seus voos, de acordo com a situação de ocupação, repetindo uma requisição prévia para os demais voos. A justificativa dessa estratégia é que a pior rota (mais longa, por exemplo) é a que possui a menor chance de congestionar, possuindo uma maior probabilidade de disponibilidade.

Através da análise dos resultados das diversas abordagens das simulações, os autores constataram a estratégia moderada possui o melhor desempenho global.

Entretanto, o desafio verificado é projetar um sistema que recompensa comportamentos que levam a um desempenho global desejado. Em termos de teoria dos jogos, isso significa re-moldar o próprio jogo, ao invés das estratégias dos jogadores (Wolfe et al., 2008).

Baseados em seus experimentos, os autores concluem que a abordagem equilibrada é a mais promissora, uma vez que ela produziu resultados semelhantes à abordagem ótima (quando aeronaves possuem voos semelhantes), mas sem contar com uma função de avaliação de voo global.

## 3.4 Abordagens em Programação Inteira

### 3.4.1 Equidade no Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo

Como a maioria dos trabalhos de ATFM existentes detém seus focos unicamente na fluência e segurança do tráfego de aeronaves, Bertsimas e Gupta, em 2009, pesquisaram técnicas para se conseguir uma maior equidade entre as companhias aéreas, distribuindo o impacto das medidas restritivas aplicadas.

Em seu trabalho *Fairness in Air Traffic Flow Management*, os autores apresentam os resultados iniciais de uma pesquisa de ordenação de decolagem de aeronaves, utilizando conceitos de *fairness* com modelos de programação inteira.

Sua pesquisa justifica-se na abordagem de que os modelos existentes para o ATFM não impõe os seguintes controles:

- eles não garantem que a ordem de chegada dos vôos na “solução resultado” é próxima à ordem de vôo dos horários originalmente publicados, isto é, não existem garantias no número de inversões de pares (*pairwise reversals*), e;
- as companhias aéreas não são levadas em conta no processo de tomada de decisão, isto é, não existem garantias no resultado de distribuição de atrasos entre as companhias aéreas envolvidas.

Por *fairness*, no contexto deste trabalho, os autores definem: justiça, igualdade, imparcialidade, equidade, etc, entre passageiros e companhias aéreas. Também esclarecem que a noção de justiça, amplamente acordada pelas companhias aéreas, é “ter uma programação que preserve a ordem de chegada dos vôos em um aeroporto, de acordo com os planos previstos”. Mas, dadas as limitações de capacidade dos setores, os planos previstos nem sempre são seguidos, e nem sempre é possível ter uma solução viável sob este aspecto.

Assim, para se conseguir este objetivo, os autores apresentam um conceito de *pairwise reversals*, conforme definido abaixo:

- um conjunto  $R$  de “pares de vôos” que são reversíveis entre si;
- a composição de  $R$  através de vôos  $f$  e  $f'$ .
- uma variável  $D$  que representa um limite possível de atraso, em minutos, em que um vôo  $f$  pode chegar ao seu aeroporto de destino, sem causar impacto no sistema.

Estes pares de vôo  $(f, f')$  pertencem a  $R$  se as seguintes condições são satisfeitas:

1. O aeroporto de destino de ambos os vôos  $f$  e  $f'$  é o mesmo;
2.  $a_f \leq a'_f \leq a_f + D$ , isto é, a hora programada da chegada do vôo  $f'$  no aeroporto de destino situa-se entre a hora programada de chegada do vôo  $f$ , e a hora atrasada de  $D$ .



Para cada par de vôos  $(f, f') \in R$ , conta-se uma “reversa”, se na solução resultado, o vôo  $f'$  chega antes do vôo  $f$ .

Desta forma, os autores conseguem efetuar trocas de horários de vôos, sem afetar o sistema de forma significativa, calculando uma ordem mais justa de escalonamento de vôo de aeronaves, após a aplicação de uma medida restritiva. Seus resultados apontam um pequeno acréscimo de 10% no atraso total provocado no cenário aéreo, com a vantagem de se aumentar a justiça e a satisfação entre as companhias aéreas.

### 3.5 Abordagem da Proposta Sugerida

Como visto neste capítulo, existem diversas técnicas aplicadas com o objetivo de resolver problemas em ATFM. As soluções apresentadas utilizam abordagens sobre sistemas especialistas, programação inteira, aprendizagem por reforço, metodologia HCI e aplicações distribuídas com o uso de técnicas multiagentes.

A proposta deste trabalho é baseada em um agente autônomo que utiliza a RL, associada a uma metodologia HCI de desenvolvimento, que trabalha com medidas restritivas baseadas no problema da espera em solo.

A modelagem do agente utiliza conceitos apresentados em (Dib, 2004), (Tumer and Agogino, 2008), (Wolfe et al., 2008) e (Bertsimas and Gupta, 2009). O algoritmo utilizado na implementação é o *Q-Learning*, desenvolvido por (Watkins, 1989).

O sistema faz uso de informações sobre aeronaves, vôos e cenário aéreo, modeladas através do simulador do Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC), construído por (Ribeiro et al., 2008), a exemplo do FACET, utilizado no trabalho de (Tumer and Agogino, 2008).

As medidas restritivas sugeridas pelo agente são baseadas em ações armazenadas em uma tabela que representa sua própria experiência. Esta experiência é composta por medidas restritivas sugeridas pelo Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF) (Souza, 2008), através de algoritmos de fluxo máximo, e medidas restritivas utilizadas pelos controladores de tráfego aéreo, baseadas em sua experiência com o cenário aéreo.

A solução proposta utiliza pontos específicos aos artigos citados, com diferentes contribuições inovadoras, tais como:

- uma nova arquitetura focada no cenário aéreo brasileiro;
- uma estrutura baseada em um agente autônomo;
- medidas restritivas baseadas na espera em solo;
- uma função de recompensa que leva em conta pontos como custos financeiros e equidade, e;
- a criação de um índice que reflita o impacto gerado pelas medidas restritivas aplicadas.

A metodologia, arquitetura e modelagem do sistema proposto serão apresentadas em maiores detalhes nos Capítulos 5 e 6.

# Capítulo 4

## SISCONFLUX

O presente trabalho baseia-se na proposta de construção de um submódulo de Modelagem e Projeção de Impacto (MPI) para um Sistema de Apoio à Decisão (*Decision Support System* - DSS) que auxilie os controladores de tráfego aéreo no gerenciamento das medidas restritivas de controle de fluxo.

Este sistema, denominado Sistema de Aplicação e Gerenciamento das Medidas de Controle de Fluxo de Tráfego Aéreo (SISCONFLUX), foi idealizado de forma modular, possibilitando que sua construção fosse realizada em fases e de forma seqüencial. Seus principais módulos são:

- Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC)
- Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF)
- Módulo de Avaliação e Apoio a Decisão (MAAD)

Os módulos MAPC e MBF já foram desenvolvidos em outros trabalhos relacionados ao projeto SISCONFLUX, de forma que esta proposta trata da construção do último módulo componente, o MAAD.

Para que o leitor se familiarize com os objetivos e funcionalidades do sistema proposto, será abordada neste capítulo, as metodologias e arquiteturas dos módulos já construídos, o MAPC e o MBF.

Abaixo, iniciaremos com uma visão geral do SISCONFLUX.

### 4.1 Visão Geral

A crise instalada no setor de transporte aéreo, apontada por (Weigang et al., 2008), dentre outros autores, levou ao desenvolvimento de novas abordagens para a tecnologia envolvida no Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management* - ATFM).

Fatores como: a crescente utilização do transporte aéreo nos últimos anos, a intensa participação do trabalho humano no gerenciamento de fluxo, a sobrecarga de trabalho imposta aos controladores de voo, e o complexo número de variáveis envolvidas na execução da tarefa do ATFM, justificaram propostas de novos sistemas, ou a melhoria dos existentes, conforme (Weigang et al., 1997), (Silva, 2001), (Dib, 2004) e (Tumer and Agogino, 2008).

Focado no cenário aéreo brasileiro, Crespo et al. (2007) propôs um sistema de apoio à decisão para o gerenciamento de fluxo na fase de planejamento tático, analisando e propondo soluções aos congestionamentos identificados no horizonte das seis horas anteriores a operação de um voo até sua chegada ao destino pretendido.

As solução proposta é baseadas no problema da espera em solo (*Ground Holding Problem - GHP*), indicando aos órgãos de controle, novos tempos de decolagem para os aeroportos.

Para simplificar os testes envolvendo o protótipo, dados reais foram limitados ao escopo do cenário aéreo da Região de Informação de Voo de Brasília (*Flight Information Region - FIR-BS*), a qual possui o maior tráfego de aeronaves no Brasil. Posteriormente, o sistema será expandido para os demais setores do espaço aéreo brasileiro.

Portanto, este sistema inicialmente auxiliará no trabalho executado pelos controladores de tráfego aéreo do Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I), que é o Centro de Controle de Área (*Area Control Center - ACC*) responsável pela FIR-BS.

A figura 4.1 nos mostra os módulos do SISCONFLUX e sua proposta de integração com os sistemas ATFM já existentes, o Sistema de Tratamento e Visualização de Radar (STVD) e o Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo (SYNCROMAX).

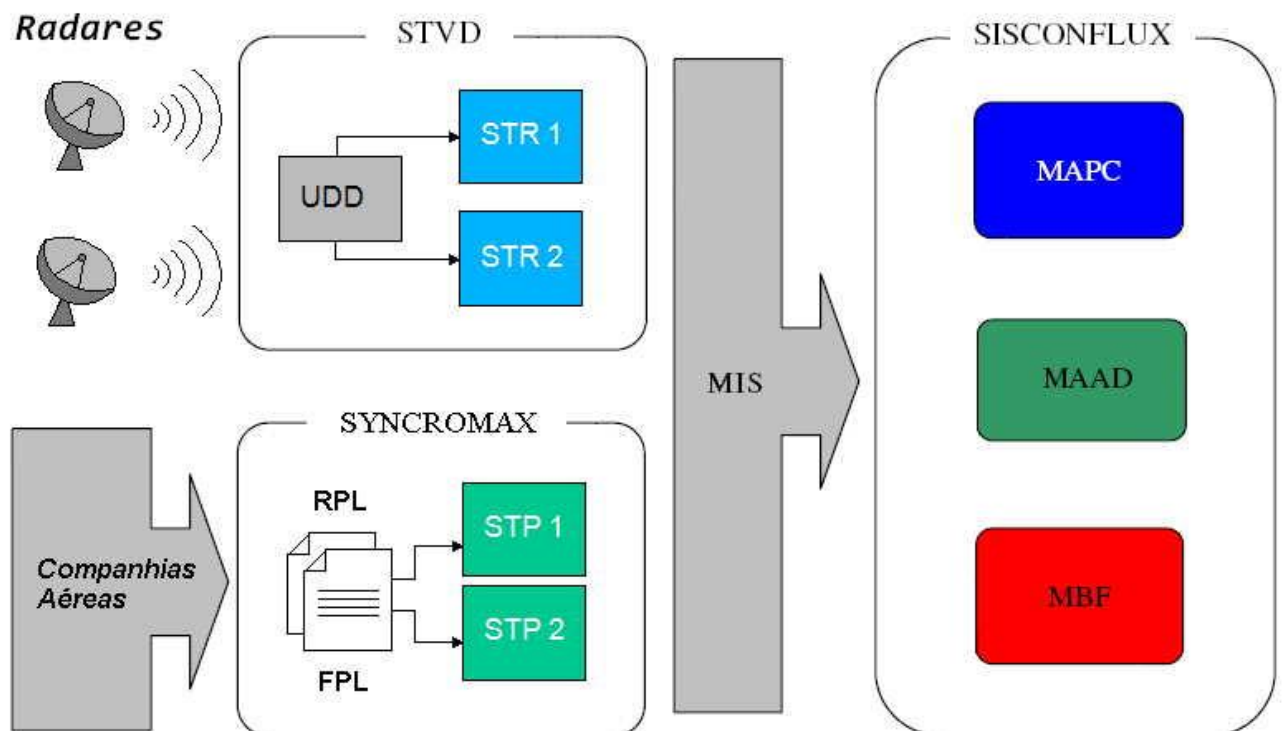


Figura 4.1: Integração do STVD / SYNCROMAX com os módulos do SISCONFLUX

Conforme visto anteriormente, o SISCONFLUX é composto de três módulos e uma interface com o STVD e o SYNCROMAX, de onde serão obtidas as informa-

ções necessárias para a identificação de congestionamentos e o processamento das medidas restritivas propostas.

Para calcular qual a medida restritiva mais apropriada para cada cenário, o sistema envolve um conjunto complexo de sub-tarefas entre todos os módulos, sendo que descrever cada uma delas vai além do escopo deste trabalho.

Entretanto, na figura 4.2 é mostrada uma simplificação de um ciclo do processamento do sistema.

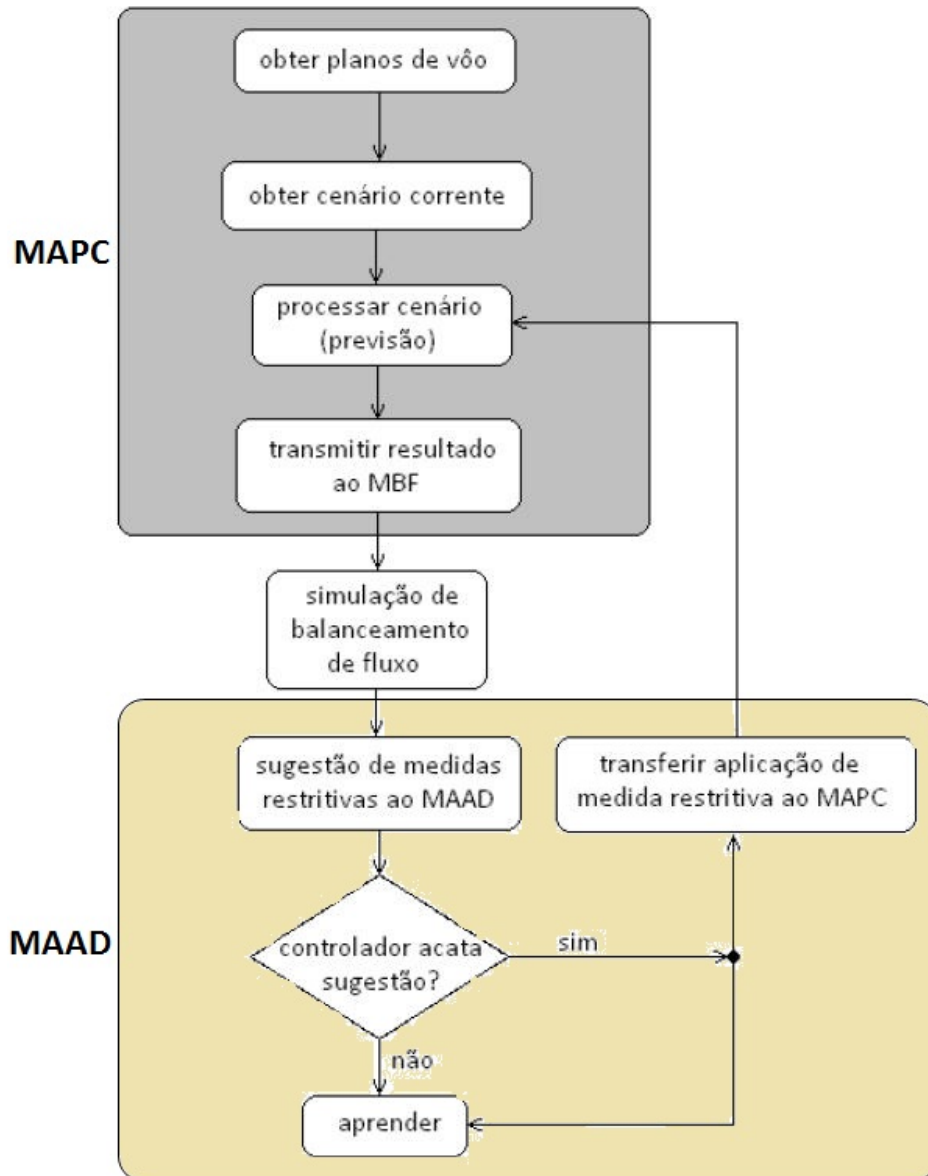


Figura 4.2: *Simplificação do Fluxo de Processos do SISCONFLUX (adaptado de Ribeiro e Ribeiro, 2008)*

As últimas tarefas da figura acima são o escopo deste trabalho, onde as medidas restritivas calculadas serão sugeridas ao centro de controle. A aplicação ou não destas medidas restritivas será avaliada pelo MAAD, e o resultado será utilizado como

alimentação de um sistema baseado na Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning* - RL). Entraremos em detalhes a respeito da metodologia e arquitetura do MAAD nos próximos capítulos.

Como cada módulo do sistema possui objetivos bem definidos, trataremos cada uma destas funções em uma seção separada.

## 4.2 Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC)

O Módulo de Interface do Sistema (MIS) e o Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC) foram implementados por (Ribeiro et al., 2008).

O MIS é o módulo responsável por receber os dados referente aos Planos de Voo Repetitivos (*Repetitive Flight Plan* - RPL) e aos Planos de Voo Eventuais (*Filed Flight Plan* - FPL), cadastrados no SYNCROMAX. Ele trata os dados de entrada através dos Sistemas de Tratamento de Plano 1 e 2 (STP1 e STP2). Através destes dados, ele alimenta os demais módulos do SISCONFLUX, com as informações necessárias para a execução de suas tarefas.

O MIS também recebe informações das aeronaves em fase de cruzeiro, ou seja, aquelas que já começaram o traslado entre pontos de origem e destino e, conseqüentemente, passaram a impactar o cenário da FIR-BS.

Esses dados são captados por pontos de notificação e/ou pontos fixos, e posteriormente recebidos pelo STVD, através de dois Sistemas de Tratamento de Radar (STR), sendo repassados ao SISCONFLUX através do MIS.

Em resumo, são tarefas do MIS:

- receber dados dos vôos RPL e FPL (SYNCROMAX)
- receber dados dos radares (STVD)
- validar os dados recebidos
- converter os dados para os formatos utilizados pelo SISCONFLUX
- alimentar o Banco de Dados SISCONFLUX (BDS)

O MAPC é o módulo do SISCONFLUX responsável por efetuar a modelagem do cenário atual da FIR-BS, com base nos dados cadastrados no BDS, e processar a previsão de vários cenários futuros a partir desta modelagem inicial.

Esse módulo é composto por três submódulos, conforme especificado na figura anterior:

- submódulo de Controle de Tabelas Gerais (CTG)
- submódulo de Modelagem do Cenário Atual (MCA)
- submódulo de Modelagem e Projeção de Cenário (MPC)

A importância do MAPC neste trabalho resume-se a sua capacidade de modelar o cenário aéreo, gerando informações que são utilizadas pelo MBF e pelo MAAD.

Podemos ver a arquitetura do MAPC na figura 4.3:

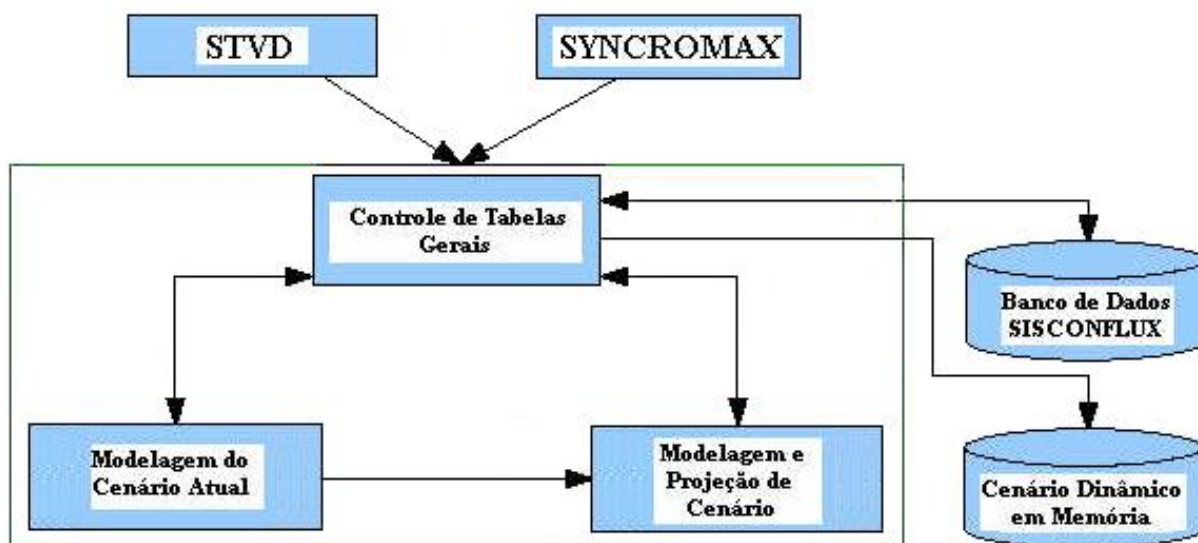


Figura 4.3: *Arquitetura do MAPC*

#### 4.2.1 Controle de Tabelas Gerais (CTG)

O submódulo Controle de Tabelas Gerais (CTG) tem por função gerenciar todas as tabelas utilizadas pelo MAPC, para a construção dos cenários.

As tarefas do CTG são:

- receber da Interface os dados necessários para a criação do cenário atual, ou seja, os dados instantâneos das aeronaves;
- tratar os dados de planos de vôo que são de interesse para o MAPC: identificação das aeronaves; velocidades planejadas de cruzeiro das aeronaves; horários presumidos de decolagem e de aterrissagem das aeronaves em seu destino; rota das aeronaves; horários presumidos de transferência de setor na rota;
- tratar os dados instantâneos das aeronaves e dos setores da FIR-BS: informações dos pontos de notificação e dos pontos fixos; setor atual de cada aeronave; velocidade instantânea de cruzeiro de cada aeronave;
- controlar as informações de rotas ativas e re-setorização;
- efetuar a manutenção das tabelas produzidas pelos submódulos MCA e MPC;
- disponibilizar essas tabelas aos demais módulos do SISCONFLUX.

#### 4.2.2 Modelagem do Cenário Atual (MCA)

O submódulo de Modelagem do Cenário Atual (MCA) é responsável por efetuar a modelagem cinemática do cenário da movimentação aérea atual na FIR-BS (Crespo et al., 2007). Esta modelagem busca as informações dos vôos armazenados na base

de dados SISCONFLUX (BDS) e executa a construção de uma abstração do cenário aéreo atual.

Os dados utilizados devem refletir fielmente a posição das aeronaves em uma aerovia (*Airways* - AWY) e sua velocidade no espaço aéreo da FIR-BS no instante atual. A partir deste cenário atual modelado, o MAPC efetua a evolução dos demais cenários previstos, através do submódulo MPC.

Ao completar um ciclo de processamento, o MCA processa as seguintes tarefas:

- recebe do CTG os dados relativos às aeronaves em movimentação no espaço aéreo;
- modela estas informações em um cenário atual;
- alimenta duas tabelas do BDS: uma para distribuição de aeronaves por setor e outra de taxa de ocupação dos setores;
- disponibiliza o cenário aos demais módulos e submódulos do SISCONFLUX;
- transmite ao submódulo MPC os dados sobre o cenário corrente computado, composto pela configuração dos setores e os atributos das aeronaves.

O cenário aéreo fornecido pelo MCA, reflete diversas informações a respeito de cada aeronave que impacta a FIR-BS, tais como: o setor atual, a velocidade instantânea e a distância restante para chegar a uma Terminal, atravessar a divisa do setor e/ou chegar a um ponto de intersecção entre rotas.

Dependendo dos dados disponíveis pelo SYNCROMAX, STVD e/ou radares, as formas de processamento para modelar um cenário aéreo podem ser:

- *estritamente estática* - utilizando planos de vôo repetitivos;
- *estritamente dinâmica* - com dados de radar;
- simultaneamente *estática e dinâmica* .

### **4.2.3 Modelagem e Projeção de Cenário (MPC)**

O submódulo de Modelagem de Previsão de Cenário é responsável por efetuar a evolução do cenário corrente da FIR-BS, ou seja, o MPC deve efetuar a previsão para cenários futuros.

Após o processamento do submódulo MCA, este carrega um modelo do cenário aéreo atual em memória, referente a um determinado horário.

Com base nas informações desse modelo, o MPC projeta novos cenários futuros, utilizando os parâmetros pré-definidos pelo usuário, armazenados no BDS.

Um desses parâmetros determina qual o intervalo de cada cenário previsto. Ou seja, as previsões de cenários futuros são calculadas através de uma série de incrementos de tempo no horário correspondente ao modelo de cenário atual. No protótipo deste trabalho, os cenários previstos serão produzidos de 10 em 10 minutos.

Outro parâmetro importante indica até quando devem ser gerados os cenários futuros, limitando a quantidade de cenários projetados. Um exemplo seria a geração de cenários limitado às próximas 2 horas, ou 4 horas, ou 8 horas, etc. Como o SISCONFLUX é um sistema de análise do movimento aéreo no *período tático*, as previsões serão feitas com 2 horas de projeção.

A evolução das aeronaves nestes cenários se dá através dos dados do cenário atual, dos radares e dos planos de vôo cadastrados (RPL e FPL), onde o MPC calcula as novas posições das aeronaves correntes e das que ainda vão entrar no cenário aéreo.

Uma única modelagem de um cenário projetado é feita por vez, para cada intervalo informado. Após concluído este ciclo, o MPC efetua a modelagem do próximo cenário futuro.

A remodelagem de cenários faz a evolução do movimento das aeronaves e atualiza a ocupação dos setores.

O resultado das remodelagens são armazenados em uma lista de modelos. Dessa lista são geradas as tabelas de *taxa de ocupação de setor* e de *distribuição de aeronave por setor*, que ficam disponíveis ao Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF).

A figura 4.4 mostra uma simplificação dos cenários aéreos produzidos pelos submódulos MCA e MPC.

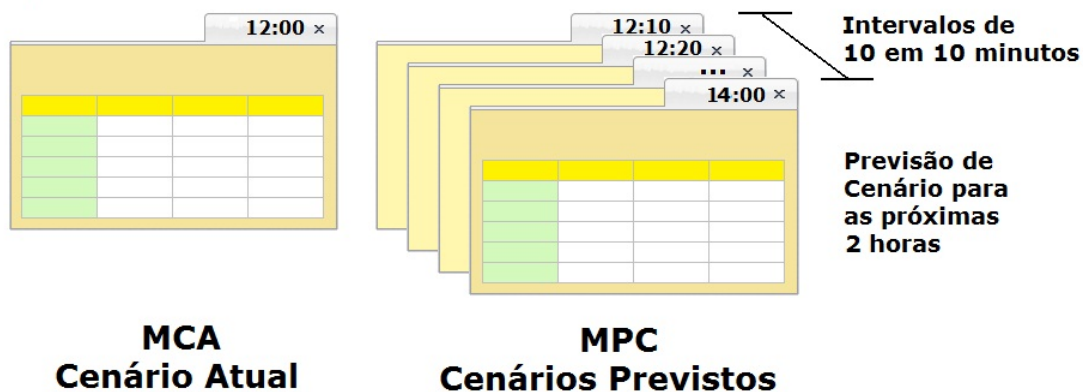


Figura 4.4: Simplificação dos Cenários Aéreos Produzidos pelo MAPC

### 4.3 Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF)

O Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF), desenvolvido e implementado por (Souza, 2008), integra o Sistema de Apoio à Decisão Aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego (SISCONFLUX) e funciona em constante interação com o Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC).

O objetivo geral do MBF é, a partir da previsão de cenário e da distribuição da capacidade de cada setor de uma FIR, sugerir medidas restritivas de fluxo que possibilitem a utilização mais adequada das capacidades setoriais disponíveis.

Uma vez que o MAPC tenha projetado o cenário aéreo relativo ao fluxo de tráfego na FIR-BS (atual e futuros), o MBF realizará a análise da distribuição dos



movimentos aéreos em evolução, assim como as intenções de evolução, nos diversos setores controlados.

Podemos ver na figura 4.5, o fluxo de atividades que o MBF deve realizar para calcular a sugestão das medidas restritivas de fluxo de tráfego aéreo.

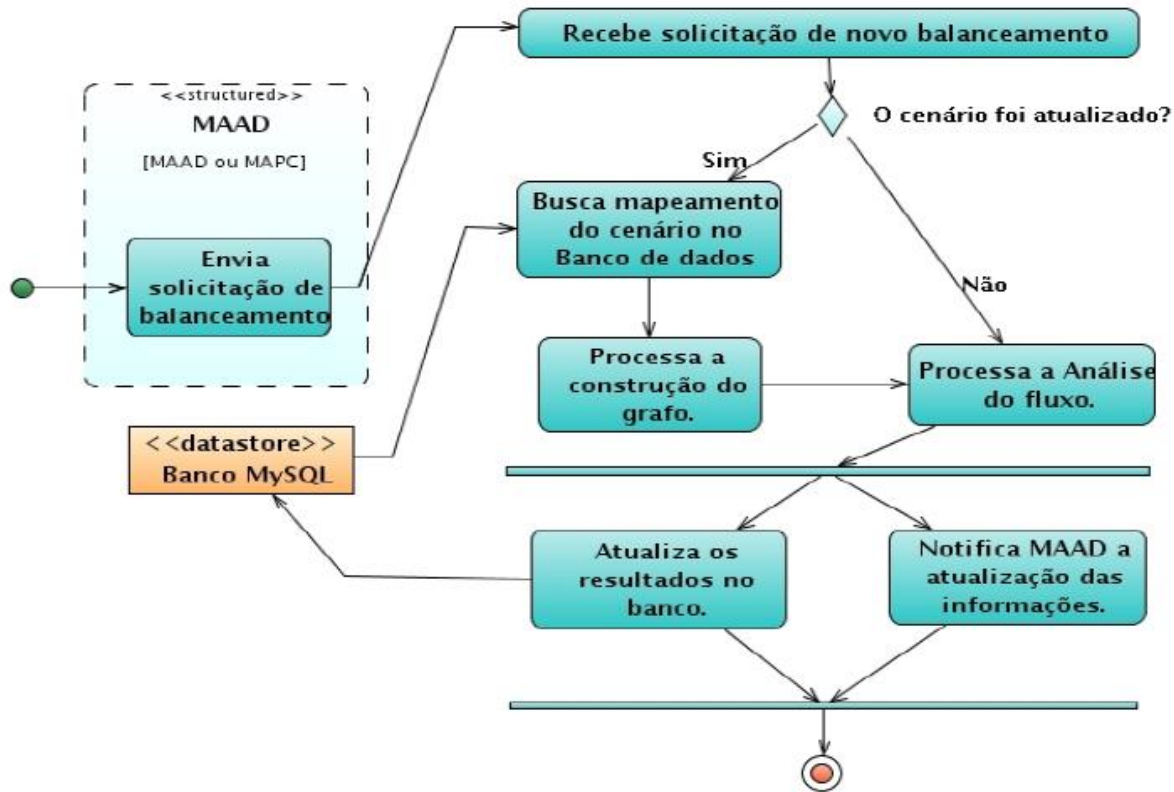


Figura 4.5: Diagrama de Atividades do MBF (Souza, 2008)

Para realizar estas tarefas, o MBF foi estruturado em três submódulos:

- *SMConstrutorGrafo* - submódulo responsável pela modelagem de grafos;
- *SMAnalisador* - submódulo responsável pela análise de fluxos aéreos;
- *Persistencia* - submódulo pelo armazenamento e recuperação de dados.

A subdivisão do MBF em submódulos tem a intenção de distribuir tarefas inerentes ao conjunto, propiciando uma melhor organização estrutural, facilitando a compreensão global.

Abaixo são listadas alguns critérios relevantes ao sistema:

- 1 A existência de um modelo de balanceamento para obtenção de um algoritmo de balanceamento de fluxo baseado em teoria dos grafos, associado a técnicas de inteligência artificial;
- 2 Um conjunto de análises heurísticas baseadas em padrões de ações comumente usadas pelos controladores de vôos;

- 3 Um conjunto de distribuição de capacidades associadas a cenários de saturação que indiquem a melhor distribuição de fluxo com as medidas restritivas mais recomendadas para tal cenário;
- 4 Um conjunto de informações relativas ao tempo de permanência da aeronave em determinado setor e tempo estimado de saída para reduzir a sub-utilização dos setores;
- 5 O mapeamento do multi-fluxo em fluxos integrantes que possam ser ajustados de maneira que determinados fluxos sejam priorizados em detrimento de outros. Tal priorização será de responsabilidade dos supervisores, observadas as orientações de melhores distribuições;
- 6 As medidas de fluxo máximo e/ou recomendável associado a cada Terminal serão convertidas em frequências de decolagens associadas aos pontos de origem. Isto advém do fato de que os controladores de vôo trabalham limitando o intervalo entre decolagens em um determinado aeroporto e não, especificamente, com o horário do vôo. Ações específicas de ajustes de horários são de responsabilidade dos aeródromos;
- 7 As ações não serão diretamente aplicadas, mas enviadas ao módulo de avaliação e apoio à decisão (MAAD) para análise e submissão aos supervisores que apreciarão as sugestões, podendo aceita-las e aplicá-las ou solicitar um novo processamento.

Podemos ver na figura 4.6, a arquitetura e integração dos submódulos do MBF.

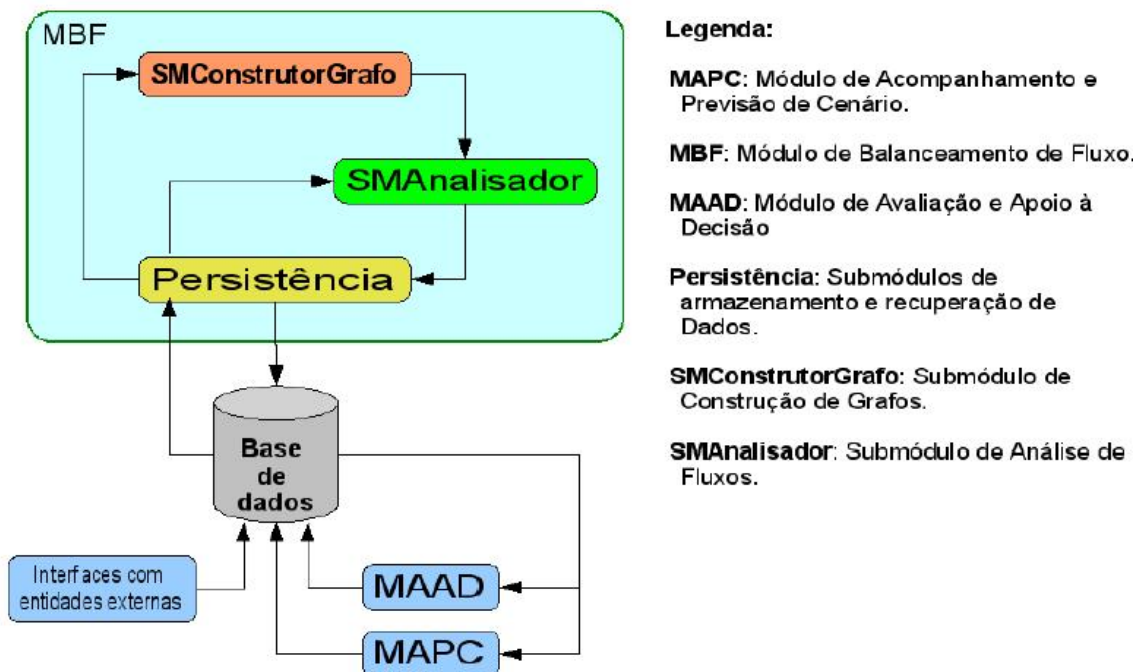


Figura 4.6: Arquitetura do Módulo de Balanceamento de Fluxo (Crespo et al. 2007)

A importância do MBF neste trabalho resume-se a sua capacidade de calcular medidas restritivas, através de algoritmos de fluxo máximo, gerando informações que são utilizadas pelo MAAD e pelos controladores de tráfego aéreo.

A seguir será apresentada uma descrição mais detalhada da funcionalidade de cada submódulo, integrante do MBF.

### 4.3.1 Construção de Grafos (*SMConstrutorGrafo*)

O cálculo das medidas restritivas de fluxo, sugeridas pelo MBF, baseia-se na aplicação de teoria dos grafos em uma representação abstrata do multi-fluxo de vôos dentro da FIR-BS.

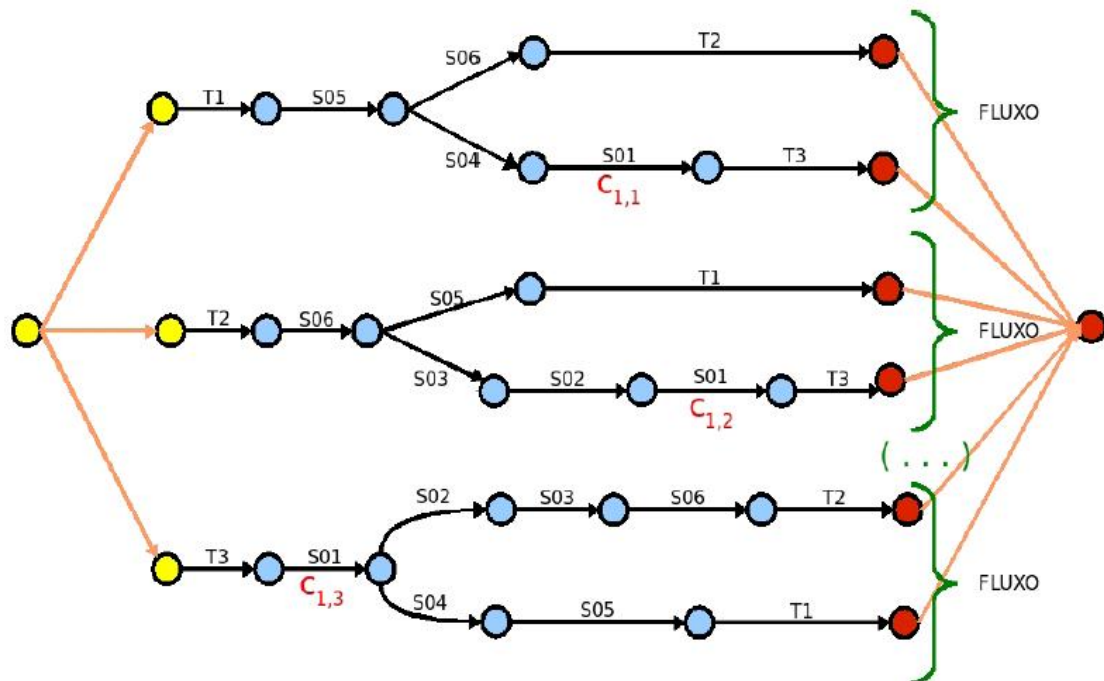


Figura 4.7: Construção de um Grafo da FIR-BS (Souza, 2008)

Na figura 4.7 é verificada a modelagem de um grafo, baseado em setores e tráfego aéreo da FIR-BS.

Portanto, cabe ao submódulo de Construção de Grafos (*SMConstrutorGrafo*) efetuar a modelagem dos cenários projetados pelo MAPC em grafos associado à situação atual dos setores, a partir das rotas incluídas na tabela de Rotas e associar os atributos dos setores ativos em cada rota.

A construção dos grafos segue o seguinte procedimento:

- 1 Carregue as rotas válidas do banco de dados.
- 2 Separe as rotas pela origem.
- 3 Para cada conjunto de origem distinta faça:

- 4 Numere os setores e Terminais que constam nas rotas de forma que cada setor receba um único número independente de sua repetição. Cada número é considerado um nó (vértice) e os setores são associados às arestas que interligam os nós.
- 5 Inclua um nó inicial rotulado por zero.
- 6 Monte uma matriz de setores rotulando cada setor com o nome do setor e ligando os nós numerados:
- 7 Construa a lista de adjacência do grafo a partir da matriz associada ao conjunto de rotas.

Este sub-módulo também trata e remove setores duplicados. Após a construção do grafo o controle é passado ao submódulo de análise.

Na figura 4.8, é apresentada a lista de adjacência do grafo produzido pelo MBF.

Nodo	0	1	2	3	4	5	6	7
0		T1						
1			S05					
2				S06		S04		
3					T2			
4								
5							S01	
6								T3
7								

Nodo	Adjacência
0	T1→1
1	S05→2
2	S06→3, S04→5
3	T2 →4
4	
5	S01→6
6	T3→7
7	

**Matriz Resultante**

**Lista de Adjacência**

Figura 4.8: *Matriz e Lista de Adjacência do Grafo (Souza, 2008)*

### 4.3.2 Análise de Fluxos Aéreos (*SMA*Analizador)

Este submódulo tem a função de computar a distribuição das folgas entre os diversos fluxos, ajustar a ocupação dos setores pelos tempos médios das aeronaves na rota, balancear o fluxo e determinar as restrições de fluxo recomendáveis segundo o balanceamento obtido.

A análise dos grafos segue a seguinte seqüência:

- 1 Distribuir as folgas de acordo com a política determinada pelo módulo administrativo (MAAD);
- 2 Executar o balanceamento;
- 3 Executar o algoritmo de ajuste da ocupação por rota;
- 4 Executar o algoritmo EDMONDS-KARP (Cormen et al., 2001).

No protótipo, uma função *parcela* retorna a parcela do fluxo que deve ser associada ao setor no fluxo e horário passados como parâmetro.

O módulo também trata a separação mínima para adicionar uma folga de segurança que garanta a saída da aeronave do setor antes da entrada de outra.

### 4.3.3 Persistência do BDS (*Persistencia*)

O submódulo de persistência tem a função de tornar transparente aos submódulos internos a comunicação com os outros módulos integrantes do sistema, que é feita através de uma conexão com um banco de dados.

Sua principal tarefa é receber e/ou buscar e formatar os dados para processamento, através de consulta ao Banco de Dados SISCONFLUX (BDS), onde as tabelas utilizadas pelo MBF estão armazenadas.

#### Tabelas de Dados Utilizadas

Para efetuar a sugestão de balanceamento do fluxo de tráfego aéreo, o MBF necessita de diversas informações, como a disposição dos setores da FIR analisada, e a ocupação de aeronaves nestes setores.

Estas informações são disponibilizadas ao sistema através da integração entre o submódulo de Persistência e o banco de dados SISCONFLUX (BDS). Este banco de dados é responsável por manter os dados referentes a todos os movimentos analisados.

Na figura 4.9, podemos ver o modelo de dados relacional utilizado na construção do MBF.

Abaixo apontamos quais as tabelas utilizadas pelo MBF, suas funções e seu relacionamento:

- *Setores* - registra os setores em operação no ACC-BS. Cada setor possui os seguintes atributos: um código de identificação inteiro (codSetor) que é único, um nome (nomeSetor), um código que identifica o tipo de setor (tipoSetor) e mais três valores inteiros que representam a capacidade do setor, a ocupação atual do setor e a ocupação prevista para o setor.
- *TemposMedios* - tem a finalidade de associar para cada Setor e Rota um tempo médio de percorrimto do setor pelas aeronaves. Dependendo da rota que a aeronave esteja, este valor poderá ser maior ou menor de acordo com a distância a ser percorrida.
- *Rotas* - relaciona a cada Rota uma seqüência de caracteres que descrevem a rota. Por exemplo, uma rota descrita por "T2 S6 S5 T1".
- *Vôos* - registra as aeronaves por um código de vôo (codVoo), a rota a que pertence (codRota), o tempo que ele ocupa o setor atual (tempoNo-SetorAtual), o código do setor atualmente ocupado e o código do próximo setor a ser ocupado.

Por padrão toma-se que a existência das seguintes tabelas e respectivas colunas:

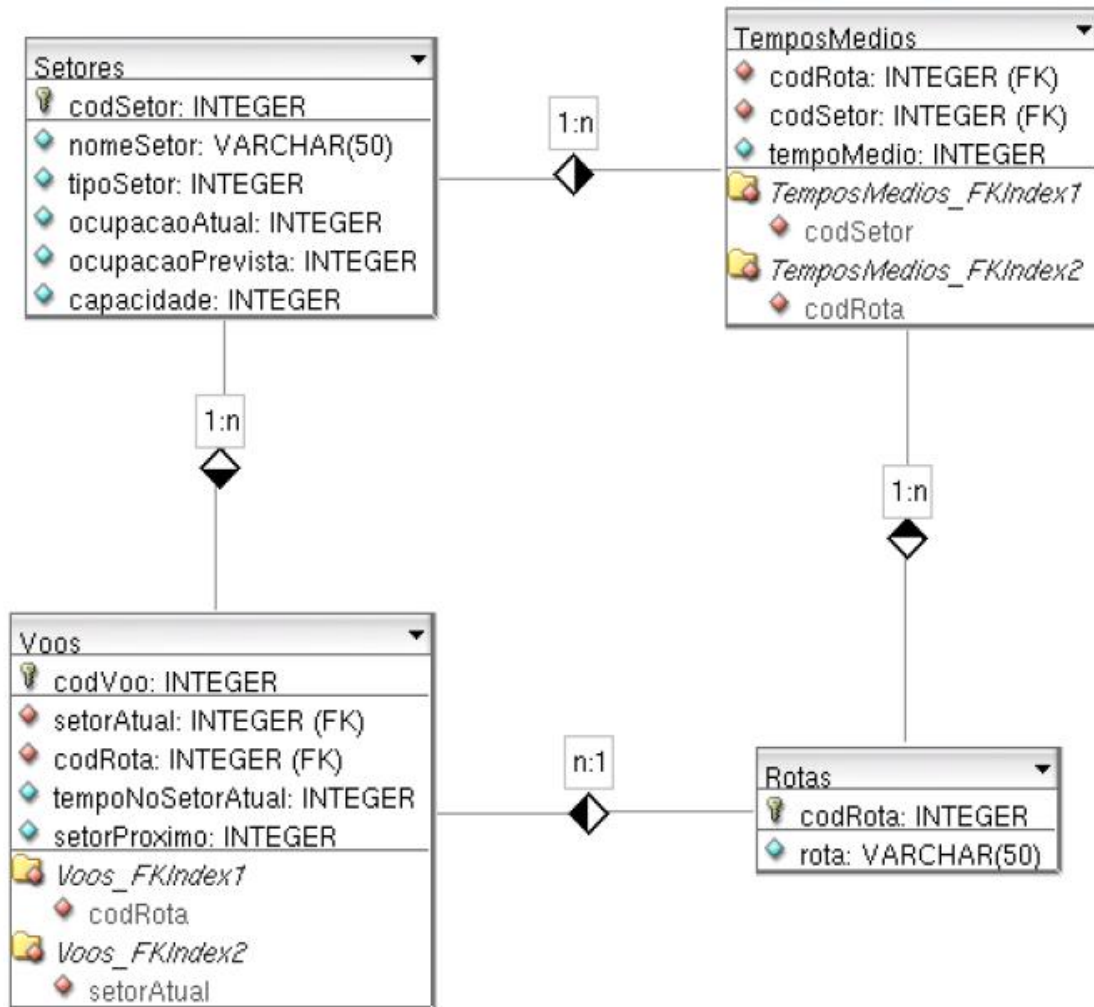


Figura 4.9: Modelo de dados relacional (Souza, 2008)

- 1 Tabela Vôos: código do vôo, código da rota prevista, o Setor em que o vôo se encontra atualmente, o tempo decorrido no setor atual desse vôo, o próximo setor a ser ocupado pelo vôo;
- 2 Tabela Rotas: código da rota e a sequência de setores na rota;
- 3 Tabela TemposMedios: código do setor, código da rota, tempo médio de travessia do setor na rota especificada;
- 4 Tabela Setores: código do setor, o nome do setor, o tipo de setor que pode ser Terminal (APP) ou setor comum (ACC), a capacidade máxima de vôos voando simultaneamente neste setor, a ocupação atual desse setor, que traduz o número de aeronaves voando no setor e a ocupação prevista e é uma informação de previsão oriunda do Módulo de Avaliação e Previsão de Cenários (MAPC).

# Capítulo 5

## Fundamentos Teóricos e Metodologia

Neste capítulo serão tratados os conceitos de metodologia HCI (*Human-Computer Interaction*), Agentes Inteligentes (*Intelligent Agents* - IA) e Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning* - RL), que serão utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Este capítulo descreverá a nomenclatura empregada mais adiante e a metodologia relacionada. A HCI, e IA e a RL são teorias consolidadas há vários anos e apresentam nomenclaturas específicas que carecem de uma descrição sucinta para que o leitor possa estar familiarizado com os termos utilizados.

Sobre a metodologia HCI, veremos a importância do desenvolvimento de uma interface entre o homem e os computadores e suas características, onde esta interface pode ser fator decisivo para o sucesso de uma implementação.

O tópico sobre Agentes Inteligentes apresenta um resumo da teoria de softwares agentes, Agentes Autônomos (*Autonomous Agents* - AA), Sistemas Multiagentes (*Multi-Agent Systems* - MAS), suas definições e áreas de utilização.

Quanto à Aprendizagem por Reforço, será feita uma breve abordagem sobre os principais conceitos relacionados à aprendizagem de um agente, a relação com o desenvolvimento do sub-módulo proposto, suas especificidades e características próprias no uso do algoritmo *Q-Learning*.

### 5.1 Interação Homem-Máquina

Conforme visto nos capítulos anteriores, o aumento do fluxo de tráfego no cenário aéreo torna necessário o desenvolvimento, adaptação e melhoramento dos sistemas atuais de Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control* - ATC).

Para manter seguro o controle do espaço aéreo, novas tecnologias e alguns dos mais sofisticados softwares ATC provêm “um ambiente rico em informações para distribuir muitos tipos de dados entre pilotos e controladores de tráfego” (Scardina et al., 1996).

Portanto, neste ambiente, um componente vital no desenvolvimento de sistemas se torna necessário: a interface que executa a troca de informações de vôo,



responsável pela Interação Homem-Máquina (*Human-Computer Interaction* - HCI) (Swenson et al., 2006).

A metodologia HCI é “um estudo de caráter inter e multidisciplinar que se preocupa com a adaptação de sistemas computacionais ao seu usuário, visando uma maior satisfação, segurança, eficiência, eficácia e produtividade entre as partes envolvidas” (Gomes, 2003).

O desenvolvimento de sistemas através da metodologia HCI procura aperfeiçoar a ergonomia e a usabilidade na relação entre os controladores e pilotos, com as informações disponibilizadas pelos sistemas ATC.

Segundo (Santos, 2002), o estudo da HCI abrange também a facilidade de uso e as novas técnicas de interação para o apoio às tarefas do usuário, visando fornecer melhor acesso à informação e criar formas mais poderosas de comunicação.

Neste trabalho, a escolha da metodologia HCI para desenvolvimento do sistema proposto se resume ao fato que pessoas, e não computadores, pilotam aeronaves, direcionam o tráfego, e detêm a palavra final em todas as decisões. Assim, a efetividade com que essas pessoas recebem e assimilam as informações envolvidas nos processos ATC, também determina a qualidade com que resolvem os problemas de tráfego aéreo.

Do ponto de vista prático, para (Santos, 2002), o projeto da interface pode acompanhar um ciclo de vida, composto das fases de análise, especificação de requisitos, prototipagem e testes.

A fase de análise compreende o conhecimento do usuário, suas características individuais e suas tarefas correntes. Na fase de especificação de requisitos é realizada a identificação de requisitos do sistema e dos dados de entrada e saída a serem dispostos na interface. A fase de prototipagem é onde são elaborados os modelos das interfaces, que serão acompanhadas pelo usuário. A fase de testes é onde são verificadas características como a integração da interface ao sistema, sua usabilidade, conformidade e recomendações.

Estas fases serão melhor detalhadas no Capítulo 7.

## 5.2 Agentes Inteligentes

Na área de Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence* - AI), existem várias definições para Agentes Inteligentes (*Intelligent Agents* - IA).

Para (Russel and Norvig, 1995), agentes inteligentes têm comportamentos parecidos com os dos seres humanos, quanto ao raciocínio e sua reação às situações do ambiente à sua volta.

Segundo (Weiss, 1999), os agentes de um sistema são inteligentes quando operam de forma flexível e racional em uma variedade de circunstâncias ambientais a partir das informações que possuem e da capacidade efetiva e perceptiva.

Em uma definição mais generalizada, um agente pode ser considerado uma entidade computacional interativa, persistente e ativa que percebe, raciocina, age e se comunica em um ambiente.

Assim, para que um software possa ser caracterizado como um IA, ele deve possuir características como autonomia e reatividade, em situações não programadas,



adaptando seu comportamento através da interação com o ser humano, através da sua reação com o ambiente, ou com outro agente.

Um sistema baseado em IA pode ser composto por Agentes Autônomos (*Autonomous Agents* - AA) ou agentes que interagem entre si, formando um Sistema Multiagentes (*Multi-Agent System* - MAS).

- *Agentes Autônomos* - são sistemas inteligentes que interagem em ambientes dinâmicos, procurando atingir objetivos bem definidos, através de esforços individuais.
- *Sistema Multiagentes* - são sistemas semelhantes aos AA, com o diferencial de possuírem a capacidade de comunicação mútua e uma meta em comum, onde trocam informações e negociam esforços para se atingir esta meta.

Apesar do estudo de IA ter começado há mais de duas décadas (Russel and Norvig, 1995), atualmente é objeto de pesquisas na área de aplicações acadêmicas, industriais e comerciais, como base de processos-chave como: resolução de problemas, planejamento, aprendizado e tomada de decisão.

O sistema proposto neste trabalho foi modelado como um AA, que interage com o cenário aéreo da Região de Informação de Vôo de Brasília (FIR-BS), sugerindo medidas restritivas baseadas no problema da espera em solo (*Ground Holding Problem* - GHP) aos controladores de tráfego aéreo.

### 5.3 Aprendizagem por Reforço

Segundo (Sutton and Barto, 1998), a Aprendizagem por Reforço (*Reinforcement Learning* - RL) é uma abordagem da Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence* - AI) que permite a uma entidade aprender a partir de sua interação com o ambiente, por meio do conhecimento sobre o estado do indivíduo, das ações efetuadas dentro deste ambiente e das mudanças de estado que aconteceram depois de efetuadas as ações.

A RL possui características da *aprendizagem não-supervisionada*, onde um agente escolhe suas ações baseado apenas na interação com o ambiente, diferentemente da *aprendizagem supervisionada*, na qual existe um tutor que diz ao agente qual deveria ter sido a ação correta para cada estado.

Na RL existe apenas um crítico, que indica o caminho correto, mas não diz exatamente a resposta correta. Isto garante maior autonomia ao agente, permitindo o aprendizado por suas tentativas e erros.

Assim, conforme (Weigang et al., 2008), o agente deve interagir com o seu ambiente diretamente para obter informações que serão processadas pelo algoritmo apropriado, a fim de executar a ação que maximize seus resultados, nos estados do ambiente.

Na RL utilizam-se estratégias com o intuito de tomar decisões rápidas, aprender de forma eficiente e aumentar a velocidade da aprendizagem. Essas estratégias são definidas na forma de quatro elementos fundamentais:

- Política de ação (controle ou tomada de decisão): é responsável pelo comportamento do agente, composta por uma função de estados para ações  $acao = \pi(estado)$ . Pode ser simplesmente uma tabela ou, em outros casos, pode envolver computações complexas.
- Função de reforço ou Função de avaliação (*reward function*): define a meta em um problema de aprendizagem por reforço. A ela é associada um estado, ou uma ação-estado, do ambiente e a um valor, denominado ganho. O objetivo do agente é maximizar o ganho acumulado em longo prazo. Esta função indica os movimentos promissores imediatos. Pode-se ver a representação desta função na figura 5.1.

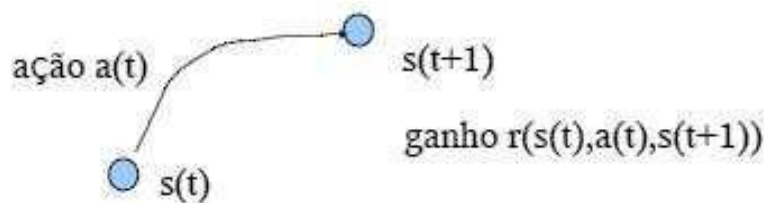


Figura 5.1: *Função de Avaliação*

- Função valor (*value function*): a função valor, ou função utilidade, indica o ganho total que pode ser acumulado no futuro se iniciarmos no estado indicado. A função valor indica o ganho acumulado ao longo do tempo a partir de um estado, levando em conta os estados que sucedem o estado corrente. É definida como  $V(s) = E[r_{t+1} + r_{t+2} + r_{t+3} + \dots : s_t = s]$ .
- Modelo do ambiente (opcional): imita o comportamento do ambiente onde, dados o estado  $s$  e a ação  $a$ , o modelo antecipa o próximo estado e o ganho. Essa antecipação é realizada através de função de probabilidade  $P(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a)$ , onde  $s_t$  é o estado atual no instante  $t$  e  $a$  é a ação a ser tomada. Estes modelos são usados para planejamento de decisão para um curso de ação ao considerarmos situações futuras antes de encontrá-las.

Recentemente, a RL tem sido empregada para a solução de outros problemas que não o ATFM, por exemplo:

- agentes inteligentes podem atuar em jogos, a exemplo do programa *TD-Gammon*, desenvolvido por Garey Tesauro, que possuía pouco conhecimento de Gamão e atingiu desempenho de grande-mestre (Tesauro, 1995);
- (Crites and Barto, 1996) utilizou a RL para solucionar o problema de controlar quatro elevadores num prédio de 10 andares, utilizando como medidas de desempenho os tempos médios de espera e de serviços dos usuários;
- com a RL, (Serra, 2004) otimizou o controle de tráfego veicular urbano, onde o agente tratava os parâmetros gerais da rodovia.

### 5.3.1 Processos Decisórios de *Markov*

Segundo (Monteiro and Ribeiro, 2003), a teoria de RL é restrita a processos de *Markov* (*Markov Decision Process* - MDP), pois “um ambiente satisfaz à propriedade de *Markov* se o seu estado resume o passado de forma compacta sem perder a habilidade de prever o futuro”, ou seja, dados o estado e ação atuais é possível prever qual será o próximo estado e recompensa esperados.

Portanto, para se implementar algoritmos de RL, as definições de *Markov* devem ser respeitadas. As equações utilizadas na RL, baseadas no MDP, são:

- Espaço de estados:  $s$
- Conjunto de ações que podem ser tomadas em cada estado:  $A(s)$  para  $s \in S$
- Probabilidades de transição:  $P(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a)$
- Ganhos:  $P(r_{t+1} = r | s_{t+1} = s', s_t = s, a_t = a)$

### 5.3.2 O Algoritmo *Q-Learning*

Um dos algoritmos mais utilizados na abordagem de RL é o *Q-Learning*, proposto por (Watkins, 1989), conforme pode ser observado no algoritmo 1.

---

**Algorithm 1:** *Q-Learning* (percepção) retorna uma ação  $a$

---

**Entrada:**  $s'$  e  $r'$ : uma percepção que indica o estado atual  $s'$  e o sinal de recompensa  $r'$

```
1 variáveis estáticas: ;
2  $Q$ , uma tabela de valores de ações indexada por estado e ação;
3  $N_{sa}$ , uma tabela de frequências correspondentes a pares estado-ação;
4  $s, a, r$ , estado, ação e recompensa anteriores, inicialmente nulos;
5 ;
6 observar o estado inicial  $s$ ;
7 se  $s$  é NÃO-NULO então
8   | incrementar  $N_{sa}[s, a]$ ;
9   |  $Q[a, s] \leftarrow Q[a, s] + \alpha(N_{sa}[s, a])(r + \gamma \cdot \max_{a'} Q[a', s'] - Q[a, s])$ ;
10 fim
11 se  $s'$  é TERMINAL então
12   |  $s, a, r \leftarrow$  nulo;
13 fim
14 se  $s'$  é NAO-TERMINAL então
15   |  $s, a, r \leftarrow s', \operatorname{argmax}_{a'}, f(Q[a', s'], N_{sa}[a', s']), r'$ ;
16 fim
17 retornar  $a$ 
```

---

Este algoritmo trabalha com uma função de avaliação  $Q(a, s)$ , implementando as regras do processo decisório de *Markov*. O valor desta função é atualizado, no decorrer do aprendizado do agente, utilizando a seguinte regra:

$$Q(a, s) \leftarrow Q(a, s) + \alpha (R(s) + \gamma \cdot \max_{a'} Q[a', s'] - Q[a, s]) \quad (5.1)$$

Onde:

- $R(s)$  é uma recompensa real para o estado  $s$ ;
- $\alpha$  é a taxa de aprendizagem, tal que  $0 \leq \alpha \leq 1$ , e;
- $\gamma$  é o fator de desconto, tal que  $0 \leq \gamma < 1$ .

Suas principais características são: trabalha em ambientes dinâmicos e estocásticos, implementa as equações da teoria MDP, não precisa de um professor ou modelo (*aprendizagem não-supervisionada*), utiliza valores baseados em estados  $s$  e ações  $a$ , podendo ser armazenados em uma simples tabela (*Q-Table*).

Ao analisar o código constata-se que, para um dado estado  $s$  atual, o agente possui várias ações  $a$  possíveis. A decisão da melhor ação a ser tomada vai depender do valor do histórico das recompensas guardadas para aquele estado/ação específicos.

Se o agente toma uma boa ação, sua recompensa será positiva, caso contrário, negativa. Quanto maior o valor da recompensa guardado para aquele estado/ação, maior a chance do agente escolher aquela ação novamente.

O algoritmo *Q-Learning* foi escolhido neste trabalho, para a implementação da RL, pois ele se aproxima diretamente do valor ótimo de  $Q(s, a)$ , independentemente da política utilizada, ou seja, os resultados sempre convergem para a melhor ação possível (Russel and Norvig, 1995).

Assim, além da simplicidade do algoritmo, consegue-se uma maior liberdade para testar e analisar diferentes funções de avaliação.

## 5.4 Metodologia de Implementação

Nesta seção será abordada a metodologia empregada na proposta do protótipo do Módulo de Avaliação e Apoio a Decisão (MAAD) do Sistema de Aplicação e Gerenciamento das Medidas de Controle do Fluxo de Tráfego Aéreo (SISCONFLUX).

Com a metodologia de desenvolvimento, baseada em fatores de ergonomia e a usabilidade das teorias da HCI, espera-se que os controladores obtenham um reconhecimento mais rápido e uma melhor visão da situação do tráfego aéreo e dos possíveis conflitos, reduzindo potencialmente a sobre-carga de trabalho cognitiva.

A interface utilizada para a integração do Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC) e o Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF), junto ao MAAD, foi desenvolvida e publicada por (Nitto et al., 2009).

Também veremos a metodologia da proposta de avaliação do nível de impacto para as medidas restritivas aplicadas sobre o cenário aéreo, implementada com a RL e o algoritmo *Q-Learning*.

### 5.4.1 Definição da Metodologia HCI

Como já visto anteriormente, os sistemas com domínio em Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management - ATFM*) proporcionam um rico ambiente para se estudar o potencial das técnicas de definição de interfaces,

fazendo uso de informações de proximidade para detecção de conflito com aeronaves e opções de resolução destes conflitos.

Neste aspecto serão utilizadas como metodologia algumas fases propostas por (Ruble, 1997). Abaixo cita-se as atividades a serem realizadas.

- Na fase de *Análise* serão realizadas visitas ao ambiente de trabalho do usuário, ou seja, o CINDACTA I, para análise do ambiente, verificação do seu método de trabalho e identificação das necessidades do usuário em relação à interface para o sistema. Com isso buscamos a identificação das tarefas que possam ser modificadas, sem mudar completamente a forma de trabalho do usuário.
- A fase de *Requisitos* será realizada por meio de entrevistas, reuniões com o usuário e visitas ao local de trabalho dos mesmos para a identificação dos requisitos necessários ao sistema, através do acompanhamento da realização das suas atividades.
- Na fase de *Prototipagem* serão realizados a construção e o desenvolvimento dos modelos das interfaces. Isto evita um esforço muito intenso para qualquer modificação após a fase de Testes. Os protótipos devem ser computadorizados onde permitirão a interação prévia do usuário, ajudando-o a se sentir mais de próximo do cenário real que lhe será apresentado pelo sistema, quando finalizado. A vantagem desta técnica é que na interação com o protótipo, o usuário revê seu processo de realização da tarefa e o desenvolvedor pode perceber muitos aspectos para modificação do sistema.
- Na fase de *Testes*, os especialistas, grupo composto pelo desenvolvedor e usuários, avaliam o design com base em um conjunto de critérios de usabilidade e métodos de avaliação. A análise deve buscar instâncias nas quais esses critérios são violados. Este método permite uma avaliação contínua do processo com um baixo custo.

#### **5.4.2 Definição da Metodologia de Projeção de Impacto**

A metodologia do sistema proposto utiliza técnicas de RL, através do algoritmo *Q-Learning*. Este sistema é baseado em um AA, que tem por objetivo sugerir a melhor ação possível, através da avaliação do cenário aéreo, quanto a medidas restritivas sugeridas e medidas restritivas tomadas.

A implementação da função de avaliação de cenário aéreo, utilizada pelo agente, localiza-se no sub-módulo de Modelagem e Projeção de Impacto (MPI), parte integrante do Módulo de Avaliação e Apoio a Decisão (MAAD). Este sub-módulo é responsável por calcular o nível de impacto causado pelas medidas restritivas adotadas pelos controladores de tráfego aéreo, através de uma função de avaliação.

A função de avaliação de cenário será composta por quatro termos, indicados abaixo:

- a quantidade de aeronaves em um setor, acima do limite de congestionamento;
- o tempo de atraso total das aeronaves do cenário aéreo;

- um índice de custo financeiro, baseado no tempo de atraso;
- um índice de equidade na distribuição das medidas restritivas entre as aeronaves, baseadas no problema da espera em espera em solo.

Cada um dos itens acima será melhor explicado no próximo capítulo.

É importante notar que as medidas restritivas aplicadas sobre as aeronaves afetam diversos fatores e entidades no cenário aéreo, como passageiros, aeronaves, tripulação, companhias aéreas, e aeroportos, entre outros. Entretanto, neste trabalho, serão avaliados índices que apontam dois fatores, caracterizados pelo custo financeiro e a equidade com que as medidas restritivas são distribuídas. A escolha destes dois fatores baseia-se nos trabalhos de Bertsimas and Gupta (2009) e Agogino and Tumer (2009).

Através dos fundamentos matemáticos do MDP, a avaliação do cenário aéreo feita pelo agente a cada ciclo, converge a resultados que indicam sempre as melhores ações para determinados estados (Weigang et al., 2008).

A estrutura utilizada na aprendizagem deste método será uma tabela (*Q-Table*), que armazenará as recompensas acumuladas para estados  $s$  e ações  $a$ .

Uma vez que a quantidade de aeronaves por setor é a informação básica para medidas restritivas utilizadas pelos gerentes de controle, os estados  $s$  foram definidos com estes dados.

As ações  $a$  foram mapeadas na forma de medidas restritivas baseadas no problema da espera em solo (*Ground Holding Problem - GHP*), aplicadas por Terminal. Assim, obtêm-se os requisitos mínimos para a implementação do algoritmo de RL.

Como a maior parte dos vôos diários é baseada em dados dos planos de vôo repetitivos (*Repetitive Flight Plan - RPL*), estes dados exploram a possibilidade de repetição de estados possíveis, onde um número limitado de ações pode ser tomado.

Tais históricos servirão como base para subsidiar apoio a decisões futuras, onde serão priorizadas as decisões que contribuíram positivamente para a modelagem do próximo cenário no sistema.

# Capítulo 6

## Arquitetura e Modelagem

Neste capítulo serão abordadas a descrição das características e o funcionamento da arquitetura proposta para o MAAD, seus submódulos e sua integração com os demais módulos do SISCONFLUX.

Também abordaremos a modelagem da metodologia aplicada à aprendizagem por reforço, as funções de recompensa e os *estados* e *ações* mapeados para o agente.

### 6.1 Visão Geral do Sistema

O Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD) integrará o Sistema Distribuído de Apoio a Decisão Aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego (SISCONFLUX) e funcionará em constante interação com o Módulo de Acompanhamento e Previsão de Cenário (MAPC) e o Módulo de Avaliação e Balanceamento de Fluxo (MBF).

Este módulo receberá e armazenará informações acerca das modificações nas políticas (tempos de decolagem) adotadas no cenário vigente, baseados nos movimentos aéreos e ações que possam implicar em alterações no fluxo de tráfego.

Através destas informações o MAAD alimentará a base de dados do sistema, para que seja possível ao MAPC modelar o cenário atual e projetá-lo através de parâmetros pré-definidos, por exemplo, de 10 em 10 minutos, pelas próximas 2 horas (fase ATFM de planejamento Tático).

Para esta modelagem e projeção, o MAPC também utiliza os dados recebidos pelo Módulo de Interface do Sistema (MIS), através do Sistema de Tratamento e Visualização de Dados (STVD) e do Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo (SYNCROMAX), como os movimentos aéreos atuais e as informações constantes nos planos de voo repetitivos (RPL) e eventuais (FPL), além de outras informações administrativas e operacionais.

Ocorrendo a previsão de ocupação com valores próximos aos limites de *congestionamento* (80% da capacidade do setor) ou *saturação* (100% da capacidade do setor), associados ou não a medidas restritivas informadas pelo MAAD, o MBF iniciará o processo de balanceamento do fluxo de tráfego.

O balanceamento realizará uma análise da distribuição dos movimentos aéreos em evolução, assim como as intenções de evolução (planos de voo RPL e FPL), nos diversos setores controlados. Este processo resultará em uma sugestão de medida

restritiva (política) baseada na espera em solo para todas as Terminais do cenário aéreo analisado.

O balanceamento será obtido mediante a aplicação de processos de balanceamento do fluxo de aeronaves dentro dos setores que integram a FIR-BS, bem como das aeronaves oriundas das outras FIRs, considerando-se as possibilidades de aplicação das medidas restritivas de fluxo de tráfego.

Uma vez que uma nova medida restritiva seja definida e aplicada ao cenário, o MAAD será alimentado com estas novas informações, gerando a realimentação para o sistema com um todo.

Na figura 6.1, mostramos o relacionamento e interligação entre os módulos que compõem o SISCONFLUX.

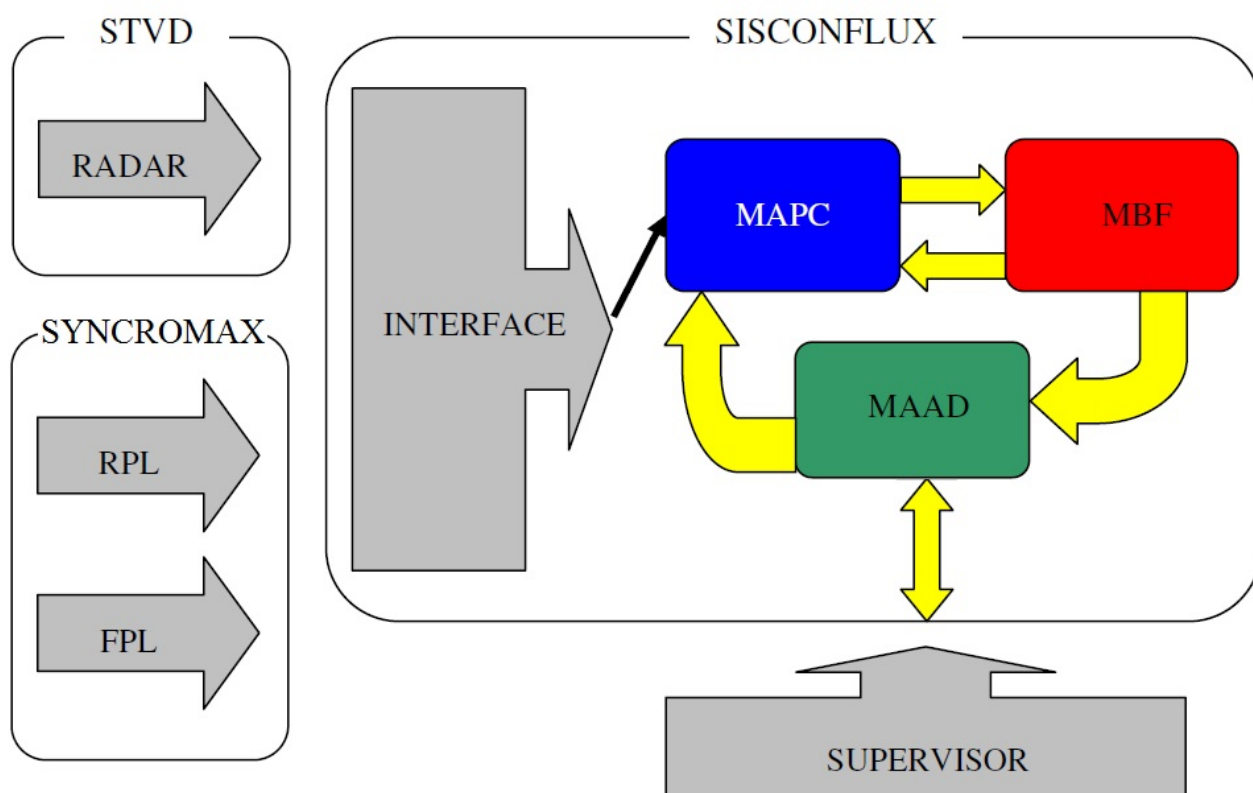


Figura 6.1: *Integração entre os módulos do SISCONFLUX*

## 6.2 A Arquitetura do Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD)

O MAAD tem a incumbência de avaliar as ações tomadas, informar a equipe operacional acerca das medidas restritivas sugeridas e efetuar o procedimento de aprendizagem que permitirá ao sistema armazenar um conjunto de decisões ideais, através de uma estrutura de estados e ações, que será implementada através da aprendizagem por reforço.



Após a escolha da decisão a ser aplicada e sua submissão ao MAAD, este avalia o cenário aéreo resultante, e acumula o resultado desta avaliação juntamente com as experiências anteriores, através das regras do algoritmo *Q-Learning* 1.

As ações, caracterizadas como medidas restritivas, são aplicadas ao cenário real para que o MAPC possa realizar a modelagem e projeção de um novo cenário, tomando por base as novas informações. Este novo cenário será a realimentação do sistema, para que possa re-processar a necessidade de medidas restritivas, caso elas sejam necessárias.

O submódulo de Modelagem e Projeção de Impacto (MPI), foco deste trabalho, é uma das funcionalidades internas do MAAD.

### 6.3 Controle de Fluxo

O SISCONFLUX foi projetado de forma a trabalhar com seus módulos, a medida em que fossem sendo desenvolvidos. Com a conclusão dos trabalhos de (Ribeiro et al., 2008) e (Souza, 2008), o apoio à decisão fornecido pelo sistema era constituído puramente de medidas restritivas baseadas na *espera em solo*.

Abaixo, na figura 6.2, verifica-se a arquitetura de funcionamento do SISCONFLUX sem o MAAD.

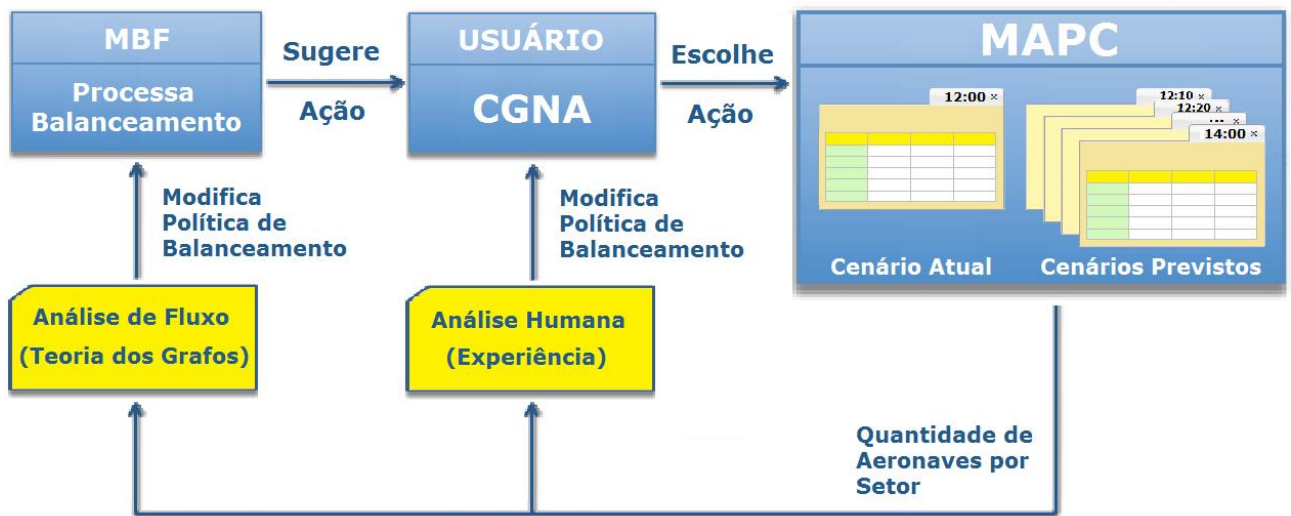


Figura 6.2: Arquitetura do SISCONFLUX sem o módulo MAAD

Atualmente, no ATFM brasileiro, os controladores tomam suas decisões a partir de informações fornecidas pelos sistemas disponíveis. No Brasil, podemos definir o ATFM em dois conceitos:

- *Human Full in the Loop* - este conceito é caracterizado pela forma com que o controlador de tráfego toma todas as medidas restritivas sobre o cenário aéreo, utilizando apenas sua experiência. Esta é a situação atual do ATFM brasileiro, onde as medidas restritivas são definidas de forma *manual* e não

é utilizado qualquer tipo de sistema que automatize o processo de tomada de decisão.

- *Human in the Loop* - neste conceito, o controlador de tráfego humano tomará decisões baseado em sugestões feitas por um agente inteligente. Desta forma, o sistema fica caracterizado como um controle *semi-automático* das medidas restritivas tomadas. Este tipo de controle justifica-se pelo fato de que o controle do tráfego aéreo é intensivamente humano, e um processo puramente automático poderia resultar em um sistema potencialmente perigoso, cujo desempenho possa degradar ou falhar, durante eventos imprevisíveis. O agente, além de avaliar dados do cenário aéreo, como nível de congestionamento e fluência do tráfego, também será responsável por indicar outros fatores, como índices de impacto quanto a equidade na distribuição das medidas restritivas aplicadas e custo financeiro gerado.

Com a integração do MAAD aos módulos já construídos, a arquitetura passa a contar com novas funcionalidades, como uma interface visual, e um módulo de aprendizagem por reforço. A arquitetura proposta pode ser verificada na figura 6.3.

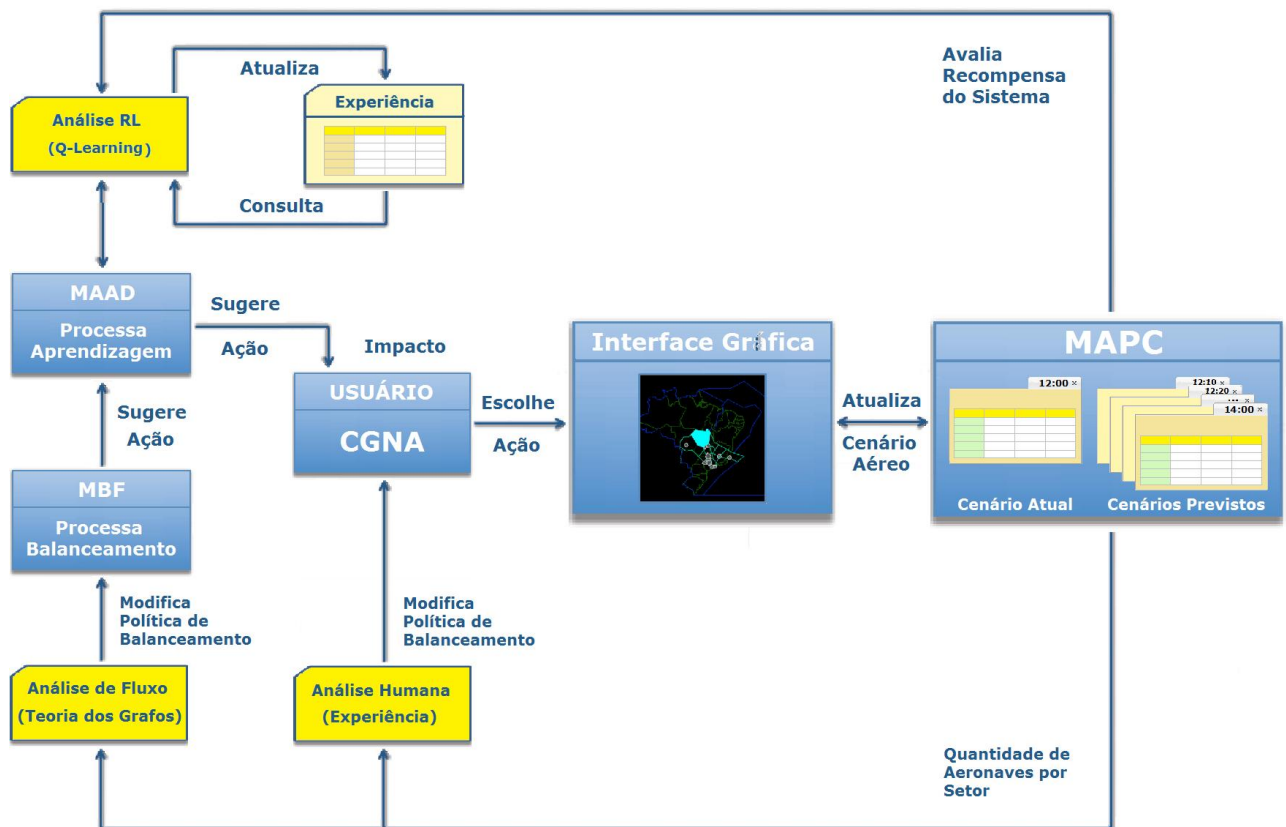


Figura 6.3: Arquitetura do SISCONFLUX com o módulo MAAD

O principal objetivo deste trabalho é discutir um modelo em que um agente fornece sugestões para um sistema semi-automático (*human in the loop*), onde o

controlador humano será simulado por um processo de escolha aleatória de ações, possibilitando ao agente aprender através de novas escolhas e evoluir utilizando a busca das melhores ações para determinado estado.

Esta abordagem resolve o dilema entre investigação e exploração (*exploitation versus exploration*), problema que consiste em balancear as ações do agente quanto a “quando se deve aprender” e “quando não se deve aprender” sobre o ambiente, mas usar a informação já obtida até o momento.

Entretanto, no cenário aéreo real, tem-se que assumir a existência do fator humano associado à tomada de decisão, onde os controladores humanos também tomam decisões que não são baseadas nas sugestões do MBF. Assim, cabe ao agente do módulo MAAD aprender a respeito das melhores decisões tomadas para determinado cenário, independente se foram originadas do MBF ou da própria experiência do controlador.

O agente aqui definido, é um algoritmo de aprendizagem por reforço tentando maximizar um amplo sistema de recompensa, composto pela quantidade de aeronaves em setores do espaço aéreo, e o tempo de atraso associado a cada uma delas.

A justificativa em se utilizar uma função de recompensa baseada na visão de congestionamentos e fluência, é de que estes são justamente os fatores que acionam a análise dos controladores humanos reais. Ou seja, situações de congestionamento implicam na tomada de medidas restritivas, que por sua vez, afetam a fluência de aeronaves no sistema como um todo.

## 6.4 Modelagem do Agente

Segundo (Agogino and Tumer, 2009), o gerenciamento do fluxo de tráfego é um problema complexo e exigente. Questões críticas incluem eficiência (por exemplo, reduzir os atrasos), justiça (por exemplo, trabalhar com diferentes companhias aéreas), adaptabilidade (por exemplo, responder ao desenvolvimento de padrões climáticos), confiabilidade e segurança (por exemplo, gerenciar aeroportos).

A fim de solucionar essas questões, definimos um sistema de aprendizagem por reforço, trabalhando no período de planejamento tático de decisões de curto prazo dos controladores de tráfego aéreo.

A modelagem proposta utiliza um agente autônomo que adquire experiência em um ambiente, utilizando a aprendizagem por reforço, fazendo o papel de um “analisador” de tráfego aéreo, com visão total sobre as variáveis do sistema. Os objetivos deste agente serão melhores detalhados nas próximas seções.

### 6.4.1 Escolhendo o Agente

Até agora foi discutido, em termos gerais, o modo como o agente interage com o SISCONFLUX e os controladores humanos. Entretanto, é necessário definir, dentro dos componentes do cenário aéreo, quem fará o papel de agente.

A modelagem apresentada baseia-se em um agente autônomo, que sugere ações aos controladores de tráfego aéreo, buscando maximizar a função de avaliação do sistema.

Os dados utilizados pelo agente são compostos por informações *on-line* sobre as aeronaves que estão impactando o cenário aéreo neste momento, e informações das aeronaves que ainda não entraram no espaço aéreo, através dos planos de vôo repetitivos e planos de vôo eventuais.

Na seleção do agente, as suas ações e a sua estrutura de recompensa é crítica para o sucesso desta abordagem. Para simplificar o protótipo construído, o agente autônomo foi definido como o módulo MAAD.

O agente será responsável por verificar entre a sugestão dada pelo módulo MBF e a sugestão armazenada em sua tabela de experiências, qual delas será informada ao controlador. Também deverá avaliar o cenário aéreo resultante da medida restritiva aplicada, e de atualizar estes dados através das regras do algoritmo *Q-Learning* 1.

O agente do módulo MAAD, através da proposta deste trabalho, além das informações utilizadas pelo controlador humano, também terá domínio sobre variáveis que indiquem a equidade na distribuição das medidas restritivas entre as aeronaves, e o impacto financeiro da medida sobre o sistema.

### **Ciclo de Aprendizagem do Agente**

O ciclo de aprendizagem do agente MAAD no processo *human in the loop* acontece nas seguintes fases:

1. Através da previsão de cenário aéreo, o MAPC detecta que um congestionamento vai ocorrer, em no máximo 2 horas, ativando o módulo MBF com estas informações;
2. O módulo MBF processa o balanceamento dos setores, sugerindo medidas restritivas de espera em solo, baseado em algoritmos de fluxo máximo, de forma a evitar que o congestionamento ocorra;
3. O agente MAAD recebe as medidas restritivas sugeridas, e consulta em uma tabela de experiências, a melhor ação baseado em seus próprios critérios;
4. O controlador de tráfego analisa as duas sugestões e, baseado em sua própria experiência, toma uma ação que pode ser qualquer uma delas, MBF ou MAAD, ou uma nova;
5. O MAAD recebe a medida restritiva escolhida pelo controlador, e calcula as recompensas para todas as ações, atualizando sua base de experiências.

Após a última fase, o sistema passa a efetuar novas previsões de congestionamento, repetindo todas as fases do ciclo.

#### **6.4.2 Tabela de Recompensas (*Q-Table*)**

A estrutura de aprendizagem por reforço utilizada é baseada no algoritmo *Q-Learning*, proposto por (Watkins, 1989). Nele, o agente utiliza uma matriz (*Q-Table*) para atualizar e consultar suas experiências com o ambiente.

Na tabela 6.1, vemos a *Q-Table* montada para  $n$  estados e  $m$  ações, onde  $Q(s_n, a_m)$  representa a recompensa calculada para o estado  $s_n$  e a ação  $a_m$ .

$Q$	$A_1$	$A_2$	$\dots$	$a_m$
$S_1$	$Q(s_1, a_1)$	$Q(s_1, a_2)$	$\dots$	$Q(s_1, a_m)$
$S_2$	$Q(s_2, a_1)$	$Q(s_2, a_2)$	$\dots$	$Q(s_2, a_m)$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$S_n$	$Q(s_n, a_1)$	$Q(s_n, a_2)$	$\dots$	$Q(s_n, a_m)$

Tabela 6.1: *Q-Table do MPI*

### 6.4.3 Estados do Ambiente

Na figura anterior, verifica-se que esta tabela é modelada através de uma relação  $s$  e  $a$ , onde  $s$  representa os estados que caracterizam o ambiente, e  $a$  as ações que o agente sugere, ao analisar o estado do ambiente.

Os estados do ambiente foram modelados como dia/horário, setores do cenário aéreo e quantidade de aeronaves por setor, com intervalos de 10 em 10 minutos, até o máximo de duas horas. O tempo de intervalo foi definido para que o agente verifique as alterações no cenário ocorridas nesse período. Na tabela 6.2, podemos ver um exemplo desta modelagem.

<i>Data – Hora</i>	<i>Setor01</i>	<i>Setor02</i>	<i>Setor03</i>	$\dots$	<i>Setor14</i>
2009.11.06 – 21 : 00 : 00	7	3	2	$\dots$	7
2009.11.06 – 21 : 10 : 00	9	4	2	$\dots$	5
2009.11.06 – 21 : 20 : 00	11	3	3	$\dots$	6

Tabela 6.2: *Estados: quantidade de aeronaves por dia / horário e setor*

### 6.4.4 Conjunto de Ações

Como conjunto de ações para o agente, existem várias maneiras diferentes na qual um agente pode controlar aeronaves, incluindo ordenar novas rotas, espera em solo e controle de distância entre aeronaves.

O conjunto de ações passíveis de sugestão pelo agente foi estruturado como tempo de decolagem baseado na espera em solo, aplicado nas Terminais de Brasília, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo, e todas as que fazem parte do cenário aéreo analisado.

Em uma Terminal, estão localizados um ou mais aeroportos, sendo que estes tempos limitam o número de aeronaves que podem sair da Terminal, reduzindo os congestionamentos previstos. Por exemplo, dependendo do tempo definido, uma aeronave pode sair da TMA-SP a cada 5 min, 10 min, 15 min, etc. Quanto maior o valor dos minutos, menos aeronaves serão capazes de decolar de um aeródromo em particular, durante períodos de congestionamentos, porque os aviões serão forçados aguardar em solo.

Portanto, a definição de altos valores de minutos de espera pode ser utilizada para reduzir a carga de congestionamentos em um setor.

<i>OrigemdoFluxo</i>	<i>TempoMinimoSugerido</i>	<i>TempoMaximoSugerido</i>
<i>TMA – BS</i>	<i>05min</i>	<i>10min</i>
<i>TMA – BH</i>	<i>05min</i>	<i>05min</i>
<i>TMA – SP</i>	<i>10min</i>	<i>15min</i>

Tabela 6.3: Ações: tempo de decolagem sugerido por Terminal

Na tabela 6.3, temos um exemplo do conjunto de tempos que o agente sugere, caso seja detectado um congestionamento.

## 6.5 Aprendizagem e Estrutura de Recompensa

As recompensas que um agente recebe nada mais são do que a atualização dos valores da *Q-Table*.

Caso, para um estado de cenário específico, seja tomada a ação  $a$ , o agente deve verificar o quanto esta ação foi “boa” ou “ruim” para o ambiente. Esta verificação irá gerar um valor de recompensa que será somado ao valor  $Q(s_n, a_m)$ .

Após um determinado número de ciclos, o agente possuirá uma *Q-Table* com experiências suficientes para refletir qual ação é melhor que a outra, em determinada situação (Watkins, 1989).

A avaliação realizada sobre o ambiente (cenário aéreo) é calculada através de uma, ou mais, funções de avaliação. Estas funções devem computar variáveis que reflitam dados significativos para os objetivos propostos. O objetivo global do agente é otimizar a avaliação do sistema como um todo. Neste trabalho, o agente possui os seguintes objetivos específicos:

1. minimizar congestionamentos nos setores, visando a segurança;
2. minimizar atrasos nas Terminais, visando a fluência das aeronaves;
3. utilizar custos financeiros e equidade entre companhias aéreas, como impacto das medidas restritivas aplicadas.

Portanto, a função de avaliação proposta é composta por três termos, representando  $C(z)$  um índice de congestionamentos,  $T(z)$  um índice do tempo de atraso nas Terminais, e  $I(z)$  um índice do custo financeiro e a equidade da aplicação das medidas restritivas entre as companhias aéreas:

$$G(z) = \beta C(z) + \delta T(z) + \gamma I(z) \quad (6.1)$$

Onde a soma dos pesos  $\beta$ ,  $\delta$  e  $\gamma$ , correspondem a 100% do resultado dos três termos para a função de avaliação.

Os fatores que avaliam congestionamentos nos setores  $C(z)$  e atrasos nas Terminais  $T(z)$ , refletem exatamente o objetivo do controlador humano, que é maximizar a segurança e a fluência. Assim, para fins de simulação e teste do protótipo com a função proposta 6.1, o agente será configurado com mais uma função, que não envolva o termo  $I(z)$ , relacionado a impacto das medidas restritivas. Esta função, foi criada e avaliada por (Tumer and Agogino, 2008) e (Agogino and Tumer, 2009), e é dada por 6.2.

$$G(z) = \beta C(z) + \delta T(z) \quad (6.2)$$

A soma dos pesos  $\beta$  e  $\delta$  correspondem a 100% do resultado dos dois termos para a função de avaliação.

Esta é uma hipótese razoável, uma vez que o congestionamento é uma preocupação primordial, que afeta tanto a segurança, quanto a carga de trabalho dos controladores. Estamos modelando, portanto, um agente que pode ser configurado com uma das duas funções de avaliação propostas.

- uma que utiliza fatores relacionados ao impacto das medidas restritivas aplicadas, e;
- uma que representa a análise básica dos controladores de tráfego humanos, através da combinação linear da meta intrínseca de se procurar reduzir o congestionamento, aumentando o tempo de atraso no sistema.

O objetivo do agente, neste trabalho, é escolher a ação que leva a melhor performance do sistema,  $G(z)$ , maximizando esta recompensa utilizando um algoritmo de aprendizagem por reforço.

Como consequência, uma tabela simples (*Q-Table*), baseada imediatamente no reforço do agente é utilizada. Em cada ciclo, um agente toma uma ação e, em seguida, recebe uma recompensa avaliada nesta ação. Após tomar uma ação  $a$  e receber uma recompensa  $R$ , o agente atualiza o seu valor pela ação  $a$ ,  $V(a)$ , que é a sua estimativa de valor por se tomar essa ação, como segue:

$$V(a) = (1 - \alpha) V(a) + (\alpha)R \quad (6.3)$$

Onde  $\alpha$  é a taxa de aprendizagem. A cada ciclo, o agente escolhe uma ação com o maior valor na tabela, com probabilidade  $1 - \alpha$  e escolhe uma ação aleatória com probabilidade  $\alpha$ . Esta é uma simples variação da equação do *Q-Learning*, 5.1.

Os termos que compõem as funções 6.1 e 6.2, são formados por algumas sub-funções, que serão melhor detalhadas nas próximas seções.

### 6.5.1 *Função de Avaliação: Minimizando Congestionamentos*

Para computar congestionamentos nos setores do espaço aéreo, o agente deve verificar a quantidade de aeronaves em determinado momento. É importante notar

que o espaço aéreo é uma infra-estrutura que deve ser utilizada até seu limite de capacidade. No Brasil, um congestionamento é caracterizado por doze ou mais aeronaves em um setor. Ou seja, o agente deve verificar a quantidade de aeronaves, por setor, acima do limite estipulado.

Abaixo verificamos a equação que computa este valor.

$$C_s(z) = \theta (Q(z) - c) \epsilon^{(Q(z) - c)} \quad (6.4)$$

Onde  $C_s(z)$  é a quantidade de aeronaves que excede o limite de congestionamento  $c$  definido para o setor  $z$ , e  $Q(z)$  é a quantidade atual de aeronaves em um setor  $z$ . Caso o resultado de  $(Q(z) - c)$  seja negativo, a função de ajuste  $\theta$  zera o valor retornado, indicando não haver congestionamento.

Quando um setor está congestionado, o tempo de saída de algumas Terminais são elevados, e a extensão do tempo de atraso é proporcional à severidade do congestionamento. Assim, quanto maior o congestionamento no setor  $z$ , maior seu impacto sobre o sistema como um todo. Esta relação é dada pela exponenciação do valor de congestionamento por ele mesmo, através de  $\epsilon^{(Q(z)-c)}$ . Ou seja, quanto maior o congestionamento, maior o valor do índice  $C_s$ .

A somatória do congestionamento em todos os setores em um determinado momento é dada por  $C(z)$ .

$$C(z) = \sum_{z=1}^n C_s(z) \quad (6.5)$$

### 6.5.2 Função de Avaliação: Minimizando Atrasos

Enquanto que os tempos de espera em solo estipulados pelos controladores reduzem o nível de congestionamento em determinados setores, eles aumentam o tempo total de atraso no cenário aéreo.

Portanto, se os tempos forem estipulados com valores acima dos necessários, o controlador estará aumentando a quantidade de tempo de atraso sobre o ambiente.

Assim, o agente deve quantificar o tempo de atraso em solo das aeronaves  $d_{Agh}(a)$ , através da seguinte equação:

$$d_{Agh}(a) = \theta( t - (\alpha (t_{As}(a), t_{Aes}(a))) ) \quad (6.6)$$

E deve quantificar também o tempo de atraso em ar  $d_{Aah}(a)$ :

$$d_{Aah}(a) = \theta( t - (\alpha (t_{Ac}(a), t_{Aec}(a))) ) \quad (6.7)$$

Onde  $t$  é o horário atual, em minutos,  $t_{As}(a)$  é o horário programado para saída da aeronave  $a$ ,  $t_{Aes}(a)$  é o horário real de saída da aeronave  $a$ ,  $t_{Ac}(a)$  é o horário programado para chegada da aeronave  $a$ , e  $t_{Aec}(a)$  é horário real de chegada da aeronave  $a$ .



A função  $\alpha$  computa o tempo previsto ( $t_{As}(a)$  ou  $t_{Ac}(a)$ ), caso o tempo real ( $t_{Aes}(a)$  ou  $t_{Aec}(a)$ ) ainda não esteja disponível, ou seja, aeronave ainda não saiu ou chegou do aeroporto. E a função  $\theta$  indica um resultado igual a zero, caso o valor seja negativo, significando que a aeronave não se encontra em atraso.

A soma de  $d_{Agh}(a)$  e  $d_{Aah}(a)$ , resulta no atraso total por aeronave:

$$d_{Ath}(a) = d_{Agh}(a) + d_{Aah}(a) \quad (6.8)$$

O somatório do tempo de atraso das aeronaves por Terminal  $T_t(a)$  resulta no indicador de atraso total no sistema  $T(z)$ .

$$T_t(a) = \sum_{a=1}^n d_{Ath}(a) \quad (6.9)$$

$$T(z) = \sum_{z=1}^n T_t(z) \quad (6.10)$$

### 6.5.3 Função de Avaliação: Impacto de Custos Financeiros e Equidade

A função  $I(z)$  é composta por dois termos, representado por indicadores de: equidade  $J_{Ad}(a)$  e custos financeiros  $F_{Ath}(a)$ .

$$I(z) = J_{Ad}(z) + F_{Ath}(z) \quad (6.11)$$

As companhias aéreas aceitam como justo, que os horários de chegada dos vôos sejam respeitados conforme publicados nos RPL, que é conhecido como “princípio de equidade” (Bertsimas and Gupta, 2009).

Assim definimos que, para um total de atraso  $m$ , em minutos, ocasionado por uma medida restritiva, este total seja distribuído igualmente entre todas as aeronaves afetadas.

Portanto, o indicador de equidade  $J_{Ad}(a)$  é dado pelo somatório  $J(a)$ , conforme abaixo:

$$J_{Ad}(a) = \sum_{a=1}^n J(a) \quad (6.12)$$

$$J(a) = |100 - (d_{Agh}(a) \cdot 100) / (d_{Td} / size(Term, t_{ini}, t_{fim}))| \quad (6.13)$$

Onde  $d_{Agh}(a)$  é o atraso da aeronave  $a$  em solo, em minutos,  $d_{Td}$  é atraso total em uma Terminal, em minutos,  $size$  é uma função que retorna quantidade de ae-

ronaves que sofreram atraso em um período de tempo, entre  $t_{ini}$ , e  $t_{fim}$ , Term é a Terminal onde o atraso ocorreu,  $t_{ini}$  é o horário início do cálculo do atraso, e  $t_{fim}$  é o horário fim do cálculo do atraso.

Já o indicador de custo financeiro  $F_{Ath}(a)$  é dado por:

$$I_{Ath}(a) = \theta ( d_{Ath}(a) - D_a )^{1 + \theta ( d_{Ath}(a) - C_a )} \quad (6.14)$$

Sendo  $C_a$  uma variável definida em função do tempo máximo que uma aeronave pode atrasar, antes de ser cancelada, em minutos,  $D_a$  uma variável definida em função do tempo máximo de atraso que uma aeronave pode sofrer, sem prejudicar outros vôos, em minutos (Bertsimas and Gupta, 2009),  $t_{Ath}(a)$  o atraso total da aeronave  $a$ , em minutos, e  $\theta$  uma função que indica um resultado igual a zero, caso o valor seja negativo.

Toda medida restritiva aplicada no sistema gera algum tipo de custo às companhias aéreas, que envolvem gastos adicionais com combustível, tripulação, taxiamento, equipamento, etc.

Com a intenção de se visualizar o impacto dos atrasos do ponto de vista financeiro, um custo médio por atraso, representado por um valor monetário, também será calculado.

Alguns trabalhos, como (Report, 2000), mostram que existem diversas formas de se calcular custos para um vôo, em consequência de diversos fatores. Entretanto, nesta dissertação, foi utilizada uma tabela simplificada de custo médio, por tipo de aeronave, quanto ao tempo de atraso em solo ou no ar.

Para os custos financeiros médios, multiplica-se os minutos em atraso, para atrasos em solo e para atrasos no ar, por tipo de aeronave, obtendo um valor estimado, agrupado por aeronave, por companhia aérea, por aeroporto, por Terminal, e pelo cenário aéreo avaliado.

Dado um determinado atraso no plano de vôo, gerado por medidas restritivas, podemos utilizar um parâmetro de custo médio por companhia aérea causado pela espera em solo. Este parâmetro deve ser estimado através de pesquisas às companhias. Assim, o custo referente ao custo financeiro gerado pela decisão do controlador pode ser calculado por uma adaptação de  $v_F(z)$ .

$$v_F(z) = \sum_{z=1}^n c_F(z) \quad (6.15)$$

$$c_F(a) = d_{Ath}(a) * cp(a) \quad (6.16)$$

Onde:  $v_F(z)$  representa o valor referente ao custo financeiro gerados pela medida restritiva,  $c_F(a)$  representa o custo financeiro por aeronave dado uma determinada ação,  $d_{Ath}(a)$  representa o tempo adicional gasto por uma aeronave com a ação tomada, e  $cp(a)$  é o parâmetro referente ao custo por minuto de atraso, de uma companhia aérea.

O valor referente a  $cp(a)$  pode ser definido em qualquer moeda. O sub-módulo também pode fazer as devidas conversões para a moeda corrente brasileira na apresentação destes dados ao controlador de vôo.

A equação 6.16 foi sugerida neste trabalho, para se calcular custos médios, de forma que uma medida restritiva possa ser avaliada a partir deste fator. Entretanto, o agente proposto neste trabalho utiliza a equação 6.14 como um nível de impacto referente ao custo financeiro das medidas restritivas aplicadas.

Como este trabalho trata do desenvolvimento do submódulo de Modelagem e Projeção de Impacto (MPI), e a equação 6.16 não faz parte de suas funcionalidades, a 6.16 não será implementada no MAAD.

# Capítulo 7

## Implementação

Neste capítulo são apresentadas as informações referentes à construção do Módulo de Avaliação e Apoio a Decisão (MAAD).

O protótipo do MAAD foi implementado para a simulação do algoritmo de aprendizagem por reforço, com dados reais de movimentos aéreos da FIR-BS, onde a função de avaliação proposta 6.1 é validada, através da análise do cenário aéreo resultante das medidas restritivas sugeridas pelo agente.

Na implementação do protótipo, utilizou-se a plataforma Java (*Sun Microsystems*, versão 1.5) e o banco de dados relacional *MySQL* 5.0.45, pelas vantagens inerentes destas tecnologias, como variedade de recursos da API Java, a portabilidade, e a compatibilidade com o sistema SYNCROMAX atualmente em operação no CGNA.

### 7.1 Orientação a Objetos

A Orientação a Objetos é um paradigma de análise, projeto e programação de softwares. Nela, utiliza-se uma modelagem de componentes de sistema, na forma de objetos. Estes, comunicam-se entre si através de mensagens, interagindo para realizar tarefas específicas. Os objetos são implementados através de classes, que possuem métodos (comportamento) e atributos (estados).

Uma das grandes vantagens na programação orientada a objetos, em relação a outros paradigmas de programação, são os conceitos de herança e polimorfismo. A herança permite que as classes compartilhem atributos e operações através de um relacionamento, e o polimorfismo permite que referências de tipos de classes mais abstratas representem o comportamento das classes concretas que referenciam.

Algumas das linguagens orientadas a objetos são: Smalltalk, Ruby, C++, Python, Object Pascal, Java, dentre outras.

### 7.2 O Ambiente de Desenvolvimento

O protótipo deste trabalho foi construído em linguagem de programação Java.

A plataforma Java é um ambiente computacional desenvolvido pela *Sun Microsystems* na década de 1990, onde é possível o desenvolvimento de diversos aplicativos para ambiente *desktop* e *web*, entre outros.

A linguagem Java foi escolhida para a implementação deste protótipo, pelo destaque de suas características de portabilidade, segurança, e por ter uma extensa biblioteca (API) de rotinas diversas, e também pela facilidade para criação de programas distribuídos e multitarefa.

Na linguagem Java, os programas são compilados para um código intermediário (*bytecode*). Este código é depois interpretado por um software chamado Máquina Virtual Java (*Java Virtual Machine - JVM*). A JVM está disponível para diversas arquiteturas diferentes, como Linux, Windows, MacOS, etc. Uma vez construído um programa Java, ele pode ser executado em sua JVM específica, sem que o código fonte tenha que ser alterado ou recompilado na arquitetura alvo.

### 7.3 O Ambiente de Execução

Para a execução do protótipo deste trabalho, são necessários alguns softwares: a Máquina Virtual Java, o banco de dados *MySQL* e o servidor de páginas *Apache Tomcat*.

O *MySQL* é um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD), existente em diversas arquiteturas. Ele utiliza a linguagem SQL (*Structured Query Language*), e possui características como: portabilidade, compatibilidade entre *drivers* de diferentes linguagens de programação, interface gráfica, entre outras.

O *Tomcat* é um servidor de páginas Web (*World Wide Web*) para Java, desenvolvido pela Apache Software Foundation, que trabalha com o conceito de *Servlets* e *JavaServer Pages* (JSP), incluindo ferramentas para configuração e gerenciamento para desenvolvimento.

### 7.4 O Protótipo do Modelo

O MAAD faz parte do SISCOFLUX, o qual teve sua arquitetura descrita na Seção 4.

O protótipo sugerido neste trabalho integra o MAAD, o MAPC e o MBF, através da interface desenvolvida por (Nitto et al., 2009), além de dados reais obtidos no ACC-BS, preparados para os testes e inseridos no banco de dados.

O MAAD precisa do suporte das funcionalidades destes módulos, como a modelagem e previsão do cenário aéreo e o balanceamento do fluxo, para realizar suas tarefas.

A arquitetura deste protótipo é baseada na tecnologia Java Web, com as funcionalidades do processamento de informações através da análise das sugestões feitas pelo MBF e as medidas restritivas tomadas pelos controladores de fluxo de tráfego aéreo. O agente MAAD avaliará as decisões tomadas através da função de avaliação proposta, incorporando a experiência dos controladores nos resultados.

Os dados de entrada são consultados no banco de dados, e os resultados, armazenados para posterior utilização pelo agente no próximo ciclo. Assim, os dados de

resultado ficam dispostos como um histórico para posterior verificação e validação do comportamento do agente.

## 7.5 Implementação do Modelo

O protótipo foi implementado utilizando-se orientação a objetos, de forma que as classes foram organizadas em pacotes como mostra a figura 7.1, cada um com funcionalidades específicas.

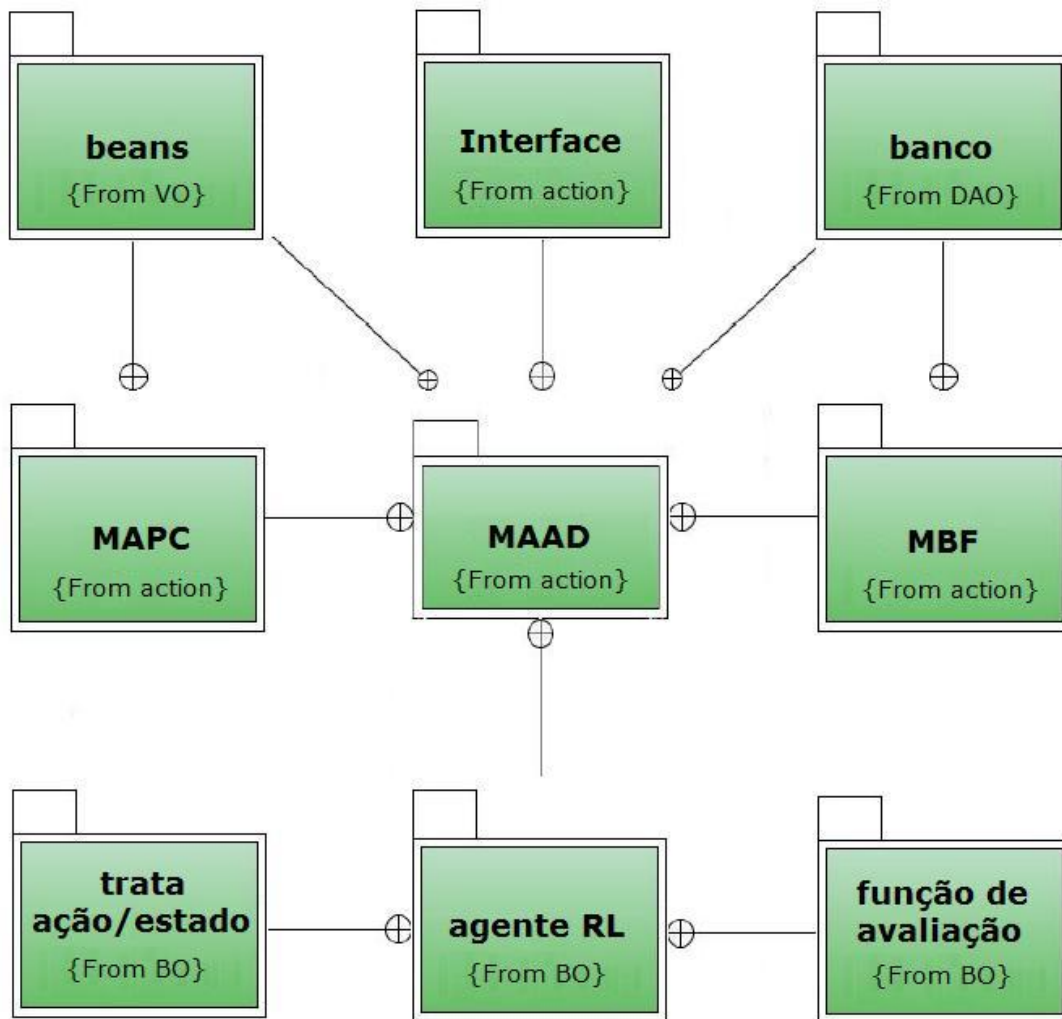


Figura 7.1: *Pacotes de Classes do MAAD*

Os pacotes Interface, MAPC e MBF, contém seus próprios pacotes de classes, que não serão exploradas em detalhes aqui, por se tratarem de trabalhos já publicados. Estas classes, juntamente com o pacote MAAD, são as classes principais do sistema, e estão localizadas no pacote *Action*, onde são responsáveis por receber os dados provenientes da entrada do sistema, dependente da tecnologia de apresentação utilizada, e por convertê-la para o formato de objeto.

As classes *beans*, localizadas no pacote VO (*Value Object*), armazenam as definições dos atributos de cada classe de forma encapsulada, bem como, suas funcionalidades. Entre as classes principais, podemos citar: Agente, Aeronaves, Custos, Resultados, entre outros.

As classes do pacote *banco*, que estão armazenadas no pacote DAO (*Data Access Object*), são responsáveis por manter a persistência das tabelas do Banco de Dados do sistema. Nela, estão localizadas as classes que possuem dados estruturados de forma semelhante as tabelas, como: DAO\_Acao, DAO\_Estado, DAO\_QTable e DAO\_Resultado.

Na figura 7.2 podemos verificar estas classes e as suas estruturas.

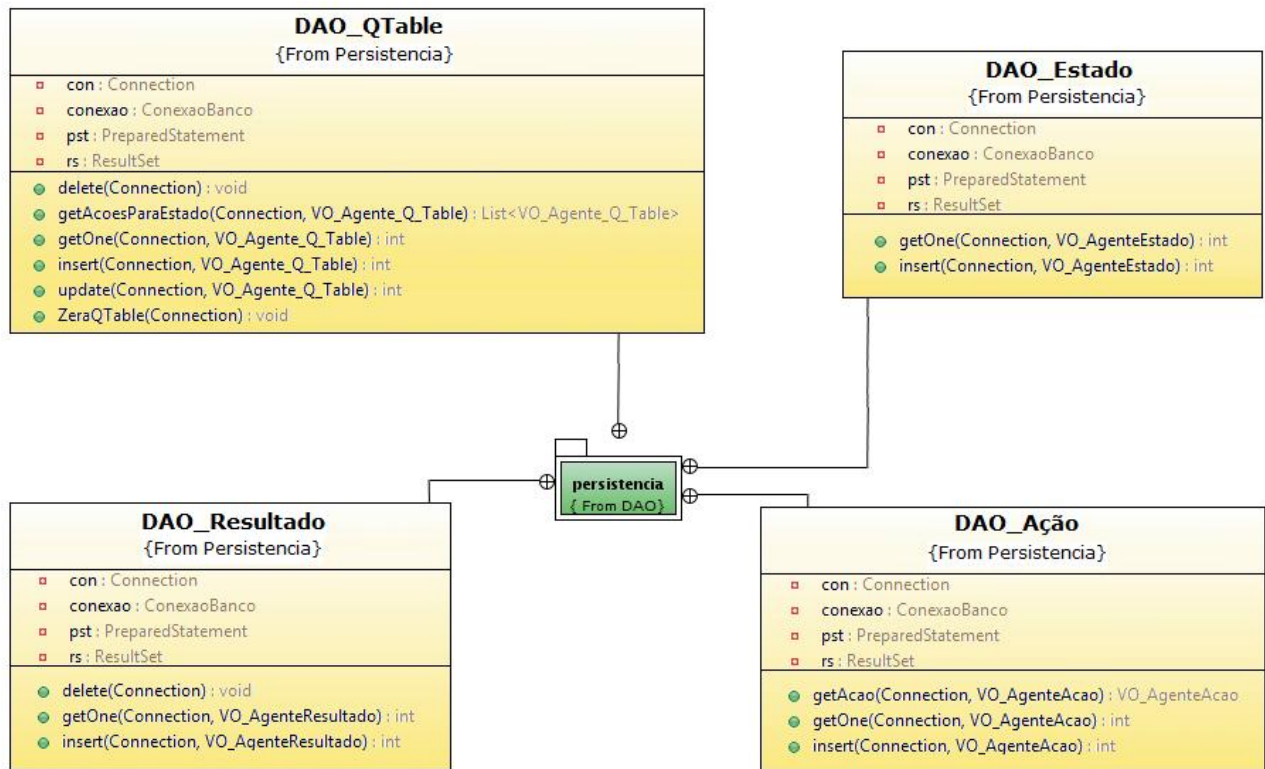


Figura 7.2: Classes do Pacote Data Access Object

No pacote BO (*Business Objects*) ficam localizadas as classes que são responsáveis pelas regras de negócio da aplicação. É neste local que se localizam toda a inteligência e as regras com que o agente deve trabalhar com o ambiente. Assim, suas principais classes são: agente\_RL, trata\_acao\_estado e funcao\_de\_avaliacao. Estas classes implementam toda a inteligência da Aprendizagem por Reforço do MAAD.

A visão do relacionamento e processos do agente, através destas classes, funciona da seguinte forma:

- o agente\_RL recebe uma medida restritiva sugerida pelo MBF;
- o agente\_RL recebe o cenário aéreo com previsão de congestionamento do MAPC;

- o agente\_RL acessa a tabela Agente\_Q\_Table através das regras da classe trata\_acao\_estado, e verifica para aquele estado, qual a melhor ação a ser tomada, segundo as regras do algoritmo *Q-Learning*;
- a melhor medida restritiva é então sugerida ao controlador de tráfego aéreo;
- este analisa o cenário projetado, a ação sugerida, e aplica uma medida restritiva, que pode ser a sugerida ou uma outra baseada em sua experiência;
- o agente\_RL do MAAD recebe esta informação, através da Interface, e avalia o cenário gerado pela medida restritiva aplicada, de acordo com as regras da classe de funcao\_de\_avaliacao;
- o agente\_RL acessa a tabela Agente\_Q\_Table através das regras da classe trata\_acao\_estado, e atualiza o valor de recompensa para aquele estado-ação específico;
- o agente\_RL acessa a tabela Agente\_Resultado e armazena os dados de histórico.

Assim, o agente do MAAD completa um ciclo de aprendizagem, sendo que, quando detectado outro possível congestionamento, os módulos são acionados, e o agente inicia um novo ciclo. O conjunto das classes agente\_RL, trata\_acao\_estado e função\_de\_avaliação, constituem o sub-módulo de Modelagem e Projeção de Impacto (MPI).

Na figura 7.3 podemos verificar estas classes, e seus métodos principais.

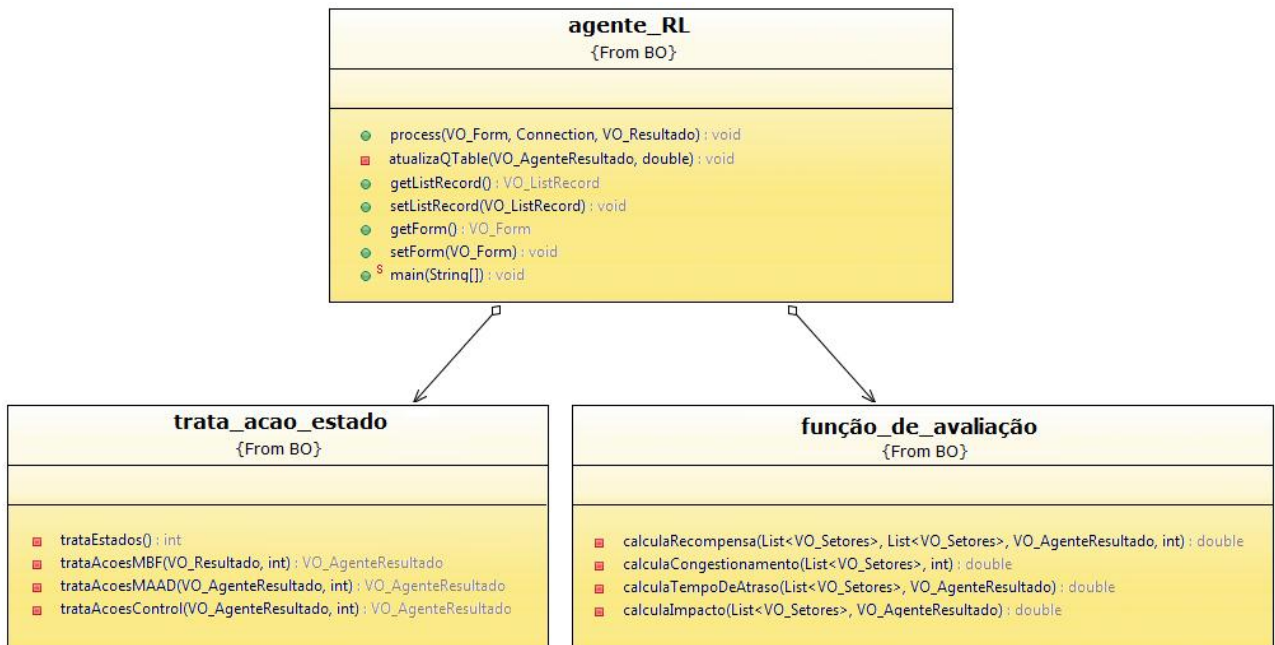


Figura 7.3: *Classes do Pacote Business Objects*

As tabelas de Banco de Dados do sistema, foram modeladas de acordo com as funcionalidades do MAAD. A tabela Agente\_Estado recebe o mapeamento de to-



dos os estados do cenário aéreo, que foram encontrados pelo agente. A tabela *Agente\_Acao* armazena todas as medidas restritivas já computadas pelo MAAD. A tabela *Agente\_Q\_Table*, armazena as experiências do agente, para cada par *estado – acao* conhecido. Toda sugestão realizada, ou medida restritiva tomada, é armazenada na tabela *Agente\_Resultado*, que representa um histórico de todos os ciclos do agente. Desta forma é mais simples analisar o comportamento do agente no sistema como um todo.

As tabelas *Aeronaves*, *Movimentos* e *Custo\_Por\_Atraso*, são responsáveis por guardar dados referentes aos tipos de aeronaves existentes, os dados de todos os movimentos aéreos da FIR-BS, utilizados nos experimentos, e os dados de custo de atraso, por aeronave, respectivamente.

Na figura 7.4, são apresentadas as tabelas utilizadas pelo MAAD.

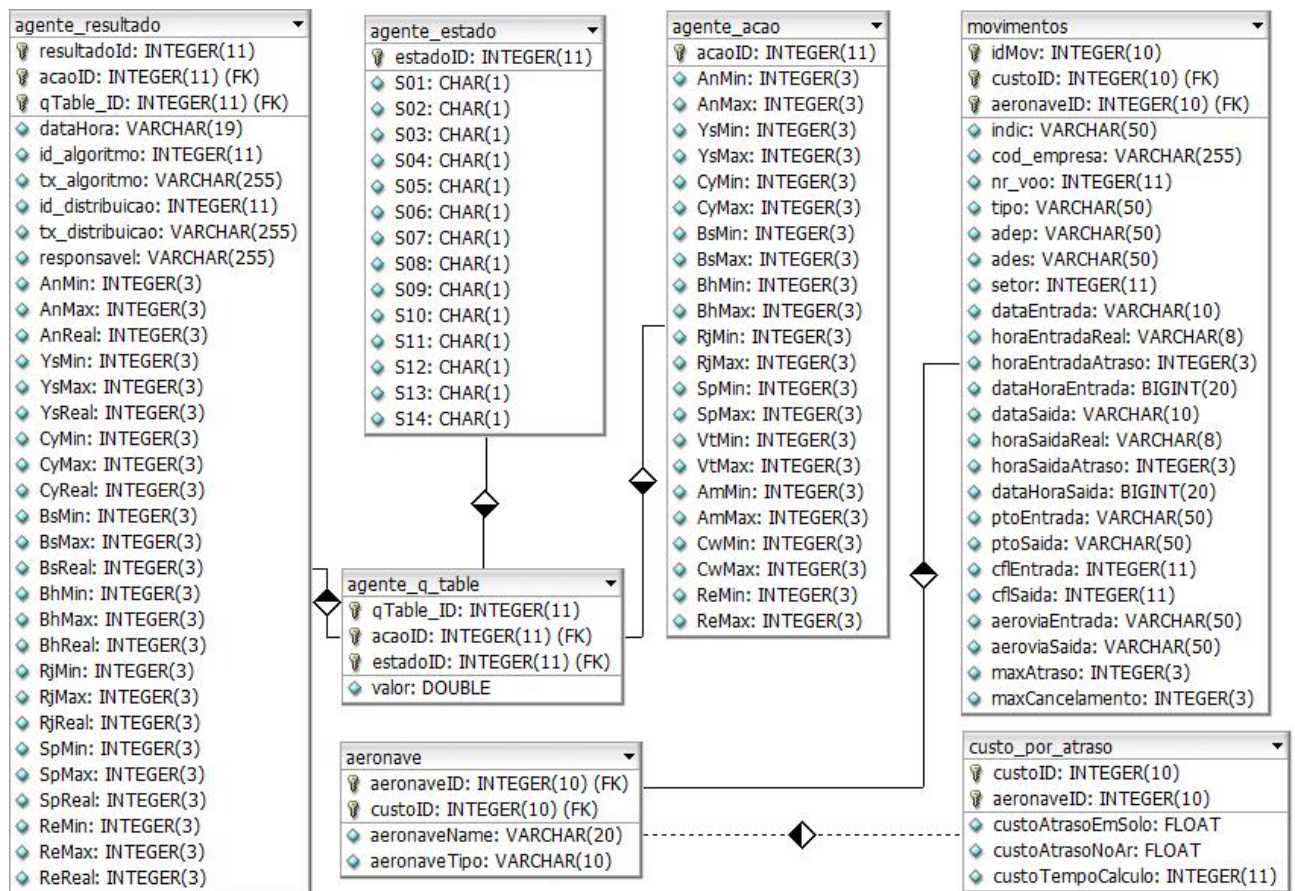


Figura 7.4: Tabelas de Banco de Dados do MAAD

A integração dos sub-módulos do MAAD com a Interface ocorreu de forma simples, onde o MBF passou a sugerir medidas restritivas a este módulo, e não mais ao controlador de tráfego.

Após o processamento do agente, o MAAD passou a fazer as sugestões de ações para tratar dos congestionamentos, e receber os dados de retorno das medidas aplicadas.

A Interface de integração de todos os módulos do sistema junto ao controlador de tráfego aéreo, que trata tanto dados de entrada quanto dados de saída, foi desenvolvida por (Nitto et al., 2009), através da metodologia HCI. Para a inclusão do MAAD em sua estrutura, apenas uma alteração simples foi necessária, de forma que suas características básicas foram preservadas.

Em sua versão original, o MBF sugeria as medidas restritivas ao usuário. Na arquitetura deste protótipo, o MBF passa a enviar as informações sobre a sugestão para o MAAD, e este é quem será o responsável por informar qual medida restritiva realmente será sugerida.

Segue abaixo, um resumo do conjunto de características desta interface:

- mapa do cenário atual;
- hora atual;
- tela de monitoramento de congestionamentos;
- tela de previsão de cenários aéreos;
- botões de controle de seleção de camadas;
- funcionalidade de armazenar múltiplas previsões de cenários, através de abas;
- possibilidade de efetuar translação entre cenários, zoom e seleção.

A situação do espaço aéreo é atualizada a cada minuto, sendo que o usuário pode, a qualquer momento, realizar uma previsão informando a data e o horário desejados. Todas as funcionalidades disponíveis na tela de monitoramento também estão disponíveis para a tela de previsões.

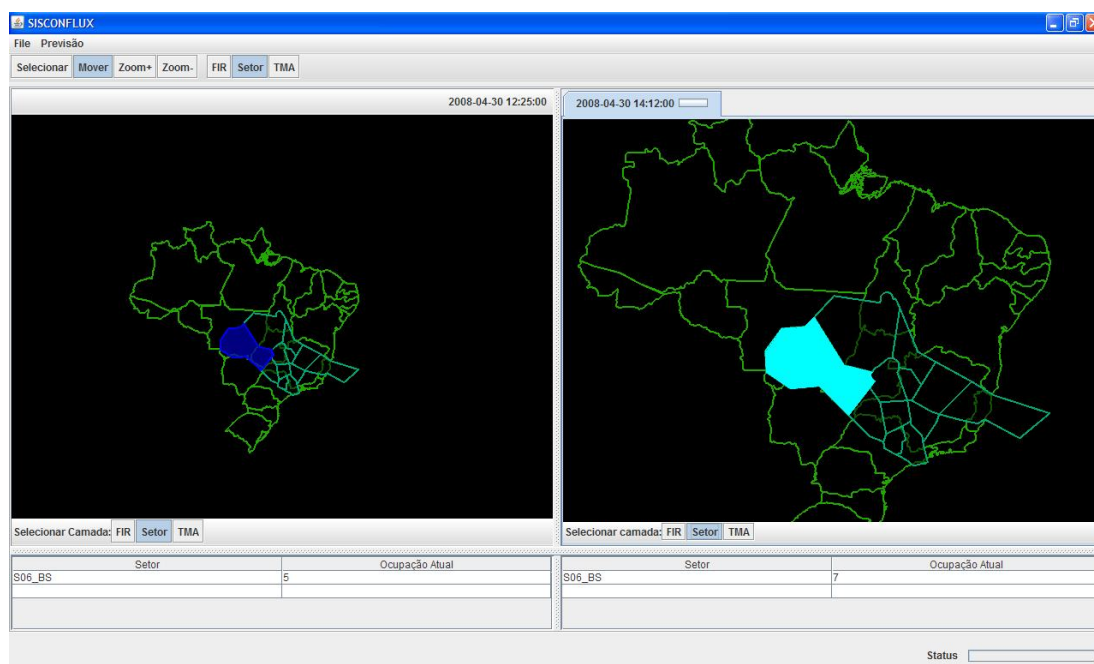


Figura 7.5: Interface do SISCONFLUX (Nitto et al., 2009)

Podemos verificar na figura 7.5, a tela de interface com o usuário.

Para a representação gráfica do espaço aéreo, a interface possui três camadas distintas. São elas:

- Camada FIR: representa as regiões de informação de vôo, FIR's;
- Camada Setor: representa a setorização de cada FIR, e;
- Camada Terminal: representa a área de controle de cada terminal, TMA.

Os botões responsáveis por separar estas camadas estão localizados logo abaixo de cada mapa. Ao selecionar algum objeto na tela, os respectivos dados são apresentados na área de dados, disponível em ambas as tela de monitoramento e previsões. Desta forma, é possível fazer comparações de uma previsão futura com o cenário atual.

# Capítulo 8

## Experimentos e Resultados

Este estudo de caso é baseado em uma análise dos resultados produzidos pelas medidas restritivas sugeridas pelo Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF) e das medidas tomadas pelos órgãos de controle de tráfego aéreo. Estes resultados são calculados através da avaliação do cenário aéreo resultante após a aplicação das ações escolhidas.

No MBF as medidas restritivas sugeridas são calculadas através de algoritmos de fluxo máximo, que asseguram a segurança e a fluência máxima das aeronaves através de uma rede de aerovias, modeladas através da Teoria dos Grafos (Souza, 2008).

Entretanto, dada a característica estocástica do cenário aéreo, existe a possibilidade de situações imprevisíveis prejudicarem qualquer tipo de previsão de congestionamentos realizada, como acidentes aéreos, fechamento de aeroportos, etc. Caso uma situação não prevista aconteça, as medidas restritivas apontados pelo MBF serão inviabilizadas. Para estas situações, a experiência do controlador de tráfego é de fundamental importância para a resolução do problema.

Assim, ajustes devem ser feitos nas medidas restritivas sugeridas pelo MBF, de forma que se adaptem a experiência dos controladores sobre situações não previstas.

Com a implementação desta proposta, o agente MAAD avalia todas as medidas restritivas aplicadas, armazenando os resultados em uma tabela de experiências (*Q-Table*), para serem posteriormente utilizados.

O objetivo do agente MAAD pode ser resumido a sugerir, dada determinada situação de congestionamento no cenário aéreo, qual a melhor ação a ser tomada, independente se esta ação foi sugerida pelo MBF ou baseada na experiência do controlador.

Para evitar discrepância nos resultados apontados pelo agente, o MBF foi ajustado para trabalhar apenas com a política de distribuição igualitária, não priorizando qualquer distribuição de folga entre os setores.

Para analisar o comportamento da função de avaliação proposta no Capítulo 6, os experimentos foram realizados sobre dados de movimentos aéreos de quatro dias distintos.

Os dados foram obtidos diretamente do CGNA e do CINDACTA I, composto por um conjunto de registro de vôos eventuais (FPL) e repetitivos (RPL) ocorridos entre

os dias 29 de abril e 02 de maio de 2008, somando um total de 12.411 movimentos aéreos.

## 8.1 Planejamento do Estudo de Caso

Para ter um melhor entendimento e avaliação do modelo proposto, este estudo de caso foi realizado através das seguintes fases:

1. Coleta de dados em quatro dias pré-determinados, com diferenças básicas de ocupação dos setores (terça-feira, quarta-feira, quinta-feira e sexta-feira); Entre os dias considerados normais no cotidiano do ACC-BS, como o dia 29 de abril, o feriado de primeiro de maio torna a quarta-feira, dia 30 de abril, um dia de alta movimentação. Assim têm-se mais congestionamentos neste dia, onde a quantidade de vôos volta ao normal no dia 02 de maio. Como a maior parte dos movimentos aéreos é composta por planos de vôo repetitivos (RPL), a rotina se repete com relativa freqüência, de forma que temos quatro bons exemplos de movimentação aérea representando congestionamentos diários em maior e menor grau.
2. Inserção dos vôos no banco de dados do sistema: os movimentos aéreos representam o trânsito de aeronaves real da FIR-BS. Como o MBF e o agente MAAD só são ativados através de previsões de congestionamento, os horários considerados críticos foram adaptados para ocorrerem com maior freqüência em setores diversos, com a intenção de acelerar o tempo de aprendizagem do agente.
3. Definição das políticas de teste: os resultados foram executados de forma que o agente seja ativado a cada congestionamento previsto, durante todos os quatro dias de movimentos aéreos cadastrados. Como os congestionamentos ocorrem em dias e horários específicos, a cada acionamento do agente, será computado um ciclo de aprendizagem.
4. Realização dos testes: os testes foram realizados através de um número fixo de ciclos, onde se observa tanto a convergência da aprendizagem sobre as melhores ações computadas, quanto a comparação dos resultados das duas funções de avaliação utilizadas.
5. Comparação dos testes entre as funções avaliação: o protótipo escolhe de forma aleatória quais as medidas restritivas escolhidas pelo controlador de vôo, de forma que o agente tenha possibilidade de aprender através de possibilidades novas, e não apenas as sugeridas pelo MBF.
6. Análise dos resultados: a execução protótipo ocorreu de forma que o agente foi configurado primeiramente com a função de avaliação baseada apenas na fluência e na segurança 6.2, e posteriormente utilizando a função que leva em consideração o impacto gerado 6.1. Os dados obtidos foram armazenados e posteriormente confrontados, dando embasamento para a análise dos resultados.

A execução do protótipo foi realizada de forma controlada e supervisionada, através de ciclos fixos pré-determinados. Os dados utilizados são selecionados da base de dados, de acordo com dia e horário utilizados. Estes são carregados em um conjunto de classes simuladoras, centralizadas dentro do objeto agente MAAD. A saída dos resultados é computada e armazenada na tabela *Agente\_Resultado* do banco de dados, a cada ciclo, agindo como um histórico das ações e estados utilizados pelo agente.

Na figura 8.1, é apresentada a estrutura da tabela *Agente\_Resultado*.

Id	Data-Hora	Responsável	Taxas Terminal Anápolis				Taxas Terminal São Paulo		
			Min	Max	Real	...	Min	Max	Real
12	2008-05-02 14:40:00	MBF	5	5	25	...	3	3	3
13	2008-05-02 14:40:00	MAAD	3	5	25	...	5	5	3
14	2008-05-02 14:40:00	Controlador	5	10	25	...	3	5	3
15	2008-05-02 17:10:00	MBF	15	20	20	...	3	3	3
16	2008-05-02 17:10:00	MAAD	5	10	20	...	3	3	3
17	2008-05-02 21:40:00	Controlador	5	10	20	...	3	3	3

Figura 8.1: *Tabela Agente – Resultado: data / hora do ciclo, responsável pelo cálculo da ação, e valores das medidas restritivas, por Terminal*

Na tabela *Agente\_Resultado*, estão dispostos todas as sugestões dadas pelo MBF, pelo MAAD e tomadas pelo controlador de tráfego, dentro da simulação do protótipo. Para cada medida restritiva indicada na tabela, são detalhados o dia e horário do congestionamento, e os valores mínimos e máximos calculados para os tempos propostos de decolagem, bem como os tempos reais praticados naquele momento.

Este estudo de caso refere-se aos resultados da avaliação do agente para algumas Terminais da FIR-BS, durante os quatro dias analisados. Como a aprendizagem do agente é baseada em ciclos de repetição, a execução dos procedimentos do protótipo é realizada no primeiro, no segundo, no terceiro e no quarto dia, consecutivamente, e após este último, o primeiro dia volta a ser analisado. As Terminais escolhidas foram a Terminal São Paulo, caracterizando um alto movimento nos 4 dias analisados, com 1.339 movimentos aéreos, uma movimentação média na Terminal Vitória, com 863 movimentos, e a Terminal Amazonas, com uma baixa movimentação, com 467 movimentos.

Na função de três termos, utilizada pelo agente MAAD, a soma dos pesos  $\beta$ ,  $\delta$  e  $\gamma$ , correspondem a 100%, sendo atribuídas de forma igual para todos os testes, como 33,33%, 33,33% e 33,34%, respectivamente. Este valores foram escolhidos pelo motivo de se verificar exatamente qual o impacto de cada termo nos resultados avaliados.

Na função de dois termos, utilizada pelo agente, que representa a visão do controlador humano a respeito de nível de congestionamento e tempo de atraso das aeronaves, a soma dos pesos  $\beta$  e  $\delta$ , correspondem a 100%, distribuídas de formas iguais para todos os testes, como 50,00% e 50,00%.

Para fins de simplificação, a função de avaliação 6.1 será chamada de *função Impacto*, e a função de avaliação 6.2 será chamada de *função Congestionamento*.



## 8.2 Caso 1: Situação de Alto Movimento

A análise será realizada entre os resultados produzidos pela função de avaliação que verifica apenas a segurança e o fluxo das aeronaves, e a função que verifica, além dos aspectos anteriores, o impacto das medidas restritivas tomadas. A política de balanceamento escolhida para o MBF é baseada em uma divisão justa e igualitária entre todos os fluxos da malha aérea.

### 8.2.1 Resultados para a Terminal São Paulo

Os resultados sugeridos pelo agente, para a Terminal São Paulo, que encontram-se em situação de congestionamento na simulação, podem ser verificados na figura 8.2.

Terminal	Melhor	Melhor	Resultado	Movimentos
	Medida Restritiva $G(z) = \beta C(z) + \delta T(z)$	Medida Restritiva $G(z) = \beta C(z) + \delta T(z) + \gamma I(z)$		
SP	CY(20,25) SP (15,20)	CY(20,20) SP (15,20)	Reduziu a taxa	1339

Figura 8.2: Terminal São Paulo: melhores medidas restritivas, por função de avaliação

A figura acima mostra o resultado da simulação com congestionamentos ocorrendo na Terminal São Paulo, onde foram observadas, para as duas funções de avaliação utilizadas, as melhores medidas restritivas sugeridas pelo agente, após o término de 5.000 ciclos.

Os tempos de decolagem indicados na tabela representam a medida restritiva baseada na espera em solo, em minutos por aeronave, ou seja, quantos minutos decorrem entre a decolagem das aeronaves dentro da Terminal. A segunda coluna da tabela refere-se aos tempos sugeridos pelo agente que utiliza a *função Congestionamento*, e a terceira coluna, o agente que utiliza a *função Impacto*.

A *função Congestionamento*, que não considera o impacto das medidas restritivas, indica que para se reduzir a quantidade de aeronaves na Terminal São Paulo, evitando um congestionamento, deve ser aplicada um tempo entre 20 e 25 minutos na Terminal Cuiabá (TMA-CY) e entre 15 e 20 minutos na própria Terminal São Paulo (TMA-SP).

Ao se utilizar a *função Impacto*, os tempos foram reduzidos na TMA-CY, visto que, reduzindo os tempos de decolagem em uma Terminal, reduz-se também a possibilidade de atrasos e cancelamentos, e também, o valor do índice de impacto financeiro e de equidade. Os tempos para a TMA-SP foram iguais.

Esse fato indica que, para este caso, houve uma pequena melhora na avaliação realizada. Entretanto, como a redução foi apenas no valor do tempo máximo sugerido para a TMA-CY, onde os valores baixaram de 20 e 25 minutos, para 20 e 20 minutos, para os tempos mínimos e máximos respectivamente, não consideramos que a utilização da *função Impacto* melhorou de fato a sugestão, mas apenas

foi realizado um pequeno ajuste nos valores, permanecendo o valor do tempo de decolagem mínimo, em 20 minutos.

Este fato ocorreu devido ao nível de congestionamento ser relativamente baixo, com apenas 13 aeronaves no setor, de forma que os valores das medidas restritivas também foi considerado baixo, afetando poucas aeronaves quanto a custos financeiros e equidade.

Assim, foi verificado que quanto menor o valor e os locais onde as medidas restritivas são aplicadas, melhor é o nível de impacto calculado pelo agente, de forma que os tempos sugeridos baseados em impacto se aproximam dos tempos sugeridos, baseados apenas no fator de congestionamento e tempo de atraso das aeronaves.

## 8.3 Caso 2: Situação de Médio Movimento

Este estudo é referente a uma Terminal com médio movimento aéreo. Devido ao feriado de primeiro de maio, que caiu numa quinta-feira, este setor também passou por situações de congestionamento. A política de balanceamento também foi ajustada para uma divisão justa e igualitária entre todos os fluxos da malha aérea.

### 8.3.1 Resultados para a Terminal Vitória

Na simulação com congestionamentos ocorrendo na Terminal Vitória, onde foi observado um número máximo de 12 aeronaves, verificamos as melhores medidas restritivas sugeridas pelo agente, para cada função de avaliação utilizada, após o término de 5.000 ciclos.

Os resultados sugeridos pelo agente, para a Terminal Vitória, podem ser verificados na figura 8.3.

Terminal	Melhor	Melhor	Resultado	Movimentos
	Medida Restritiva $G(z) = \beta C(z) + \delta T(z)$	Medida Restritiva $G(z) = \beta C(z) + \delta T(z) + \gamma I(z)$		
VT	CY(05,10)	CY(05,10)	Igual	863

Figura 8.3: Terminal Vitória: melhores medidas restritivas, por função de avaliação

Os tempos indicados na tabela representam a medida restritiva baseada na espera em solo, sugerida pelo agente, para as duas funções de avaliação analisadas

A função *Congestionamento* calculou que para se reduzir a quantidade de aeronaves na Terminal Vitória, evitando os congestionamentos previstos, deve ser aplicado um tempo entre 5 e 10 minutos na TMA-CY apenas.

A função *Impacto* também se manteve com o mesmo tempo de 5 a 10 minutos na TMA-CY. Ou seja, ambas as funções de avaliação indicaram a mesma medida restritiva.

Para este caso, ao se utilizar a função *Impacto*, os tempos sugeridos mantiveram-se os mesmos, reforçando os resultados do Caso 1, que indicam que quando as medidas restritivas impostas são de baixo valor, e os locais de aplicação também são



poucos, menos aeronaves serão impactadas, quanto a possibilidade de atrasos e cancelamentos, e conseqüentemente, quanto ao impacto financeiro e a equidade na distribuição das medidas restritivas aplicadas.

Portanto, nesta situação, as ações sugeridas pelo agente configurado com a *função Impacto* convergem para os mesmos resultados do agente configurado com a *função Congestionamento*, onde a verificação do impacto gerado não afeta de maneira alguma a avaliação feita sem este índice.

## 8.4 Caso 3: Situação de Baixo Movimento

A situação observada neste cenário é que os tempos foram elevados, em relação aos casos anteriores. Apesar de ser uma Terminal com baixa movimentação nos quatro dias analisados, a maior parte dos vôos ocorreu em horários concorrentes, tornando as situações de congestionamentos mais críticas, chegando a 15 aeronaves em um dado momento.

Portanto, a análise realizada sobre os resultados produzidos pelas duas funções de avaliação, refletiu a situação apontada. A política de balanceamento ajustada para o MBF foi igualitária entre todos os fluxos da malha aérea.

### 8.4.1 Resultados para a Terminal Amazônica

Os resultados sugeridos pelo agente, para a Terminal Amazônica, podem ser verificados na figura 8.4.

Terminal	Melhor			Melhor			Resultado	Movimentos
	Medida Restritiva			Medida Restritiva				
	$G(z) = \beta C(z) + \delta T(z)$			$G(z) = \beta C(z) + \delta T(z) + \gamma I(z)$				
MN	CY(15,20)	SP (05,10)	Am(15,20)	CY(30,30)	SP (05,10)	Am(20,20)	<b>Aumentou a taxa</b>	<b>467</b>

Figura 8.4: Terminal Amazônica: melhores medidas restritivas, por função de avaliação

Os tempos indicados na tabela representam a medida restritiva baseada na espera em solo, em minutos por aeronave, de tal forma que, dada sua aplicação na Terminal Cuiabá (TMA-CY), Terminal São Paulo (TMA-SP) e Terminal Amazônica (TMA-AM), os congestionamentos serão reduzidos.

Segundo as medidas restritivas sugeridas pela *função Congestionamento*, o controlador deve aplicar tempos entre 15 e 20 minutos na TMA-CY, entre 5 e 10 na TMA-SP e entre 15 e 20 na TMA-AM, para se resolver os problemas de congestionamento.

Podemos ver que neste estudo de caso foram identificados os maiores valores de tempos, e a maior quantidade de locais a serem aplicadas, para se reduzir congestionamentos no cenário aéreo. Esta situação pode ser justificada pelo alto nível de congestionamento encontrado neste cenário aéreo, devido ao fato de um dos dias analisados ser feriado.

Podemos verificar que os tempos calculados pela *função Impacto* foram elevadas na TMA-CY e na TMA-AM, em relação aos tempos da *função Congestionamento*.

Como as sugestões levam o controlador a aplicar medidas restritivas que resultam em atrasos consecutivos em três locais diferentes, uma maior quantidade de aeronaves será afetada. Este fato leva a um significativo aumento da quantidade de atraso imposta ao ambiente, gerando altos índices de tempo de atraso no cenário aéreo, onde o nível de equidade pode ser prejudica e os custos financeiros também aumentarão.

A *função Impacto* foi afetada por esta situação, de forma que a sugestão do agente, para se preservar uma maior justiça no impacto das medidas restritivas sobre as aeronaves, foi a se aumentar o tempo da restrição imposta na TMA-CY e na TMA-AM, respectivamente.

Portanto, a política de balanceamento nesse caso, foi sensível a quantidade de alterações no cenário aéreo.

## 8.5 Discussão de Resultados

Com base nos dados obtidos do CINDACTA I, e utilizados no protótipo, este Estudo de Caso verificou três situações diferentes para análise.

Os resultados apontados nas seções anteriores nos mostram que as funções analisadas produzem resultados semelhantes, quando o número de aeronaves afetadas pelas medidas restritivas é pequeno.

Entretanto, conforme a quantidade de aeronaves afetadas aumenta, no caso da função de impacto, verifica-se que há um aumento na possibilidade de atrasos, cancelamentos e alteração na escala de decolagens previstas. Assim, em determinados casos, o índice de impacto sobre custos financeiros e equidade também aumenta.

É importante salientar que, o agente não verifica a quantidade de movimentos presentes no cenário aéreo, mas sim as aeronaves que foram afetadas pelas medidas restritivas.

Em algumas situações também, os tempos de decolagem devem ser aumentados, preservando-se em uma maior justiça na ordenação dos vôos entre o horário previsto de decolagem e o horário realizado. Esta situação é justificada por (Bertsimas and Gupta, 2009), onde a verificação de seus resultados, para uma melhor distribuição das medidas restritivas e uma melhor ordenação das aeronaves, constatou-se um aumento de até 10% no montante de atraso gerado no sistema.

A aplicação do modelo apresentado tem destaque na possibilidade de ajuste do fluxo, e na visibilidade do impacto gerado pelas medidas restritivas. Ele também apresenta possibilidades, conforme apontadas por (Souza, 2008), de implementação de outras funcionalidades como a análise detalhada de medidas de restrição de fluxo como sugerir um tempo reduzido de órbita, ou mesmo, sugerir rotas alternativas dentro das rotas apresentadas para a construção do grafo.

Os testes foram elaborados sobre um conjunto de uma pequena parte de rotas existentes no cenário aéreo brasileiro, escolhidas manualmente, e congestionamentos adaptados para ocorrerem com uma maior frequência, possibilitando ao agente, maior rapidez na aprendizagem.

### 8.5.1 Validação do Modelo

As figuras 8.2, 8.3 e 8.4, mostram os tempos de decolagem sugeridas pelos agentes, baseadas em duas funções de avaliação, uma que leva em consideração congestionamentos e montante de atraso no cenário aéreo, e outra que verifica, além dos aspectos anteriores, o impacto das medidas restritivas tomadas.

Os dados utilizados compreendem movimentos entre os dias 29 de abril e 2 de maio de 2008. Esses dados têm origem no banco de dados do CGNA, onde foram analisados o fluxo e os congestionamentos na Terminal Amazônica, Terminal Vitória e Terminal São Paulo, com diferenças entre a utilização dos setores, da ordem de 400 movimentos aéreos, aproximadamente.

Os resultados foram verificados através de amostragens de dados armazenados na tabela *Agente – Estado*, apresentada em 8.1. No início da execução do protótipo, verificou-se a existência de diversas combinações de resultados. Entretanto, após um determinado número de ciclos, os resultados do agente convergiam para uma mesma sugestão, dada determinada situação do cenário aéreo. Este comportamento é justificado pela aprendizagem do agente, através do algoritmo *Q-Learning*, conforme (Watkins, 1989).

Também verificou-se que a utilização de variáveis que representam aspectos como impacto financeiro e equidade na distribuição das medidas restritivas tomadas é extremamente sensível às alterações referentes a quantidade de aeronaves afetadas, bem como, o atraso com que estas aeronaves decolam em relação aos horários previstos.

Verificou-se ainda que a quantidade de aeronaves no cenário aéreo não afeta as equações, preservando as ações do agente quando focadas apenas na segurança e na fluência. Entretanto, o montante de atraso produzido pelas medidas restritivas e a quantidade de locais onde são aplicadas, fazem com que o agente, baseado na função de impacto, aumente o valor dos tempos de decolagem sugeridos, para aumentar a equidade entre sua distribuição.

Vê-se, dessa forma, que o modelo tem validade e poderá ser de grande utilidade na regulação do fluxo quando integrado ao sistema SISCONFLUX, de forma que o controlador de vôo possa ter, além das informações sobre segurança e fluência, uma maior visibilidade sobre o impacto de suas ações.

### 8.5.2 Avaliação de Desempenho

O protótipo rodou nos teste em apenas uma configuração de máquina. A execução do banco de dados foi realizada de forma local (*localhost*), bem como, o servidor *Tomcat*, para tratamento das páginas HTML.

Os resultados obtidos mostram que o protótipo é bastante eficiente, mesmo executando tarefas de outros módulos do sistema. A modelagem e a previsão dos cenários são realizadas pelo módulo de previsão de cenário (MAPC), e o balanceamento de fluxo pelo MBF, dessa forma projeta-se um bom desempenho mesmo com a adição de outras funcionalidades.

Os sistemas operacionais utilizados foram versões da distribuição Linux Ubuntu para Desktop (7.10 e 8.04) e Windows Vista. A máquina utilizada foi um laptop com processador Intel Core2Duo com 4GB de memória RAM e núcleo duplo.

Na média, executando todos os módulos do SISCONFLUX, a aprendizagem do agente, em um processamento contínuo (*batch*), levou:

- 1 ciclo : 0:05 minutos;
- 100 ciclos: 4:33 minutos;
- 500 ciclos: 29:57 minutos, e;
- 1.000 ciclos: 1:05:03 minutos.

Levando em conta que congestionamentos não ocorrem com a mesma frequência dos ciclos apresentados, o tempo de processamento foi considerado bastante eficiente.

A convergência do algoritmo foi de aproximadamente 300 iterações de análise do agente sobre os dados do cenário aéreo. Entretanto, cabe salientar que quanto mais situações que envolvam definições de medidas restritivas acontecerem, mais rápido o agente autônomo aprende. Assim, o tempo de convergência pode ser diferente, dependendo do algoritmo utilizado e da variação de cenários aéreos que possuam poucos ou muitos congestionamentos.

# Capítulo 9

## Conclusão e Trabalhos Futuros

Pesquisar e desenvolver sistemas inteligentes para gerenciar o crescente fluxo de tráfego aéreo é fundamental para a eficiência e viabilidade econômica dos sistemas de transporte aéreo. Assim, este trabalho apresentou uma proposta para minimizar os congestionamentos, através de uma função de avaliação utilizada por um agente que automatiza sugestões de medidas restritivas baseadas na espera em solo.

A função proposta utiliza variáveis que apontam custos financeiros e equidade nas medidas restritivas aplicadas, de forma que estas oferecem uma nova visão do cenário aéreo ao controlador, além do ponto de vista da segurança e fluência das aeronaves. Essas medidas são sugeridas pelo agente à medida que ele aprende através da aprendizagem por reforço, com as decisões sugeridas e as tomadas pelo controlador.

Assim, consideram-se atingidos os objetivos deste trabalho, visto que foi desenvolvido com sucesso um protótipo integrando: modelagem e previsão de cenários aéreos, balanceamento de fluxo de aeronaves, automatização da sugestão de medidas restritivas utilizando aprendizagem por reforço, através de uma função de impacto.

No desenvolvimento desta proposta, foram necessárias pesquisas sobre processos de ATFM, regulamentações do cenário aéreo brasileiro e a análise de outras propostas de solução para problemas baseados na espera em solo, e em outras medidas restritivas. Para a execução deste trabalho, os colaboradores do ACC-BS e do CGNA foram essenciais no fornecimento de documentações e dados sobre o ATFM realizado.

Durante esta pesquisa e construção do protótipo, também foram realizadas diversas reuniões com as equipes que estão iniciando estudos para desenvolver outras funcionalidades no sistema. Neste período, foram estabelecidas as diretrizes para fundamentar as bases do modelo para implementação deste trabalho.

Com os dados reais inseridos no banco de dados, foi possível realizar os testes de forma mais fácil e consistente. Os experimentos mostraram que as funções de avaliação propostas são capazes de conduzir um agente a sugerir de forma inteligente, medidas restritivas compostas por outros aspectos, além dos que caracterizam apenas a segurança e a fluência do tráfego.

O uso das metodologias descritas para dar suporte ao Gerenciamento de fluxo de Tráfego Aéreo Brasileiro com a utilização de técnicas de Inteligência Artificial mostrou um grau razoável de avaliação de desempenho, e refletiu resultados consistentes à realidade dos cenários aéreos testados, na sugestão de ajuste dos fluxos internos à malha aérea.

Também é importante ressaltar que esta solução visa o aproveitamento da estrutura centralizada que hoje é utilizada no gerenciamento de tráfego aéreo. Segundo (Crespo et al., 2007), o SISCONFLUX foi proposto para dar suporte operacional ao sistema em operação no Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I) e objetiva melhorar o gerenciamento do processo aplicado pelos controladores neste centro pelo uso de técnicas de maximização de fluxo e de análise de impacto. O MPI foi desenvolvido como um modelo de análise que determina as medidas restritivas aplicadas em Terminais, através de um tempo de separação entre decolagens, com dados de movimentos aéreos da Região de Informação de vôo de Brasília (FIR-BS).

O objetivo deste trabalho foi o de validar uma função de avaliação que conduza um agente autônomo a sugerir medidas restritivas através da visibilidade de impacto, prevenindo ou reduzindo o congestionamento nos diversos setores da FIR-BS. Com a previsão de cenário do MAPC, o balanceamento de fluxo executado pelo MBF, e a sugestão inteligente de medidas restritivas do MPI, que leva em consideração as experiências do próprio controlador, podem dar suporte a regulação do fluxo de tráfego brasileiro, auxiliando os controladores e outros órgãos de controle.

Com este sistema, os controladores podem adquirir o conhecimento que os auxilie a tomar melhores decisões, bem como, passam a ter uma nova visão sobre o impacto que as medidas restritivas aplicadas causam.

## 9.1 Avaliação do Modelo

O modelo mostrou ser efetivo e consistente quanto aos dados do cenário aéreo testado. O módulo MBF foi ajustado para trabalhar apenas com políticas igualitárias, uma vez que o agente precisaria de uma estrutura adicional de cálculo de tabelas de priorização de setores para trabalhar com esta configuração, não sendo este o foco deste trabalho.

Basicamente o MPI, submódulo do MAAD, realiza processamento, recebendo os tempos de saída de uma Terminal que tem relação direta com o problema da espera em solo (*Ground Holding Problem* - GHP). Assim, o MPI recebe estas informações e verifica em sua tabela de experiências, qual a melhor medida para o cenário aéreo previsto pelo MAPC. Como o agente passa a “enxergar” também as ações aplicadas pelos controladores, e não apenas as sugeridas pelo MBF, o agente pode sugerir qualquer ação, baseado em suas próprias políticas.

Uma vez que o controlador de tráfego aéreo se decidir a respeito de uma medida restritiva, o MPI passa a avaliar esta decisão, em função do cenário aéreo resultante. Após um determinado número de ciclos, o agente possuirá experiência suficiente para indicar melhores ações ao controlador, baseado nas experiências de resolução de congestionamentos no cenário aéreo.

Quanto à visibilidade de impacto referente a custos financeiros e equidade nas medidas restritivas aplicadas, o agente faz um balanceamento, através das fórmulas propostas, sobre os custos em se aumentar os tempos de decolagem, elevando-se também os custos sobre as companhias aéreas, e melhorar a distribuição das medidas restritivas entre as aeronaves.

Neste modelo não houve a preocupação de determinar medidas restritivas de natureza crítica, isto é, medidas que envolvam maior risco como a órbita de aeronaves, alteração da velocidade das aeronaves, entre outras, nem previsão de situações como medidas emergenciais em situações de acidentes, fechamento de aeroportos, etc.

Para que o SISCONFLUX atue na determinação dessas medidas é necessário um conjunto de parâmetros que possibilitem uma análise mais detalhada de cada voo dentro dos setores.

Destaca-se ainda, que a função de avaliação proposta, é a primeira versão no protótipo, e que, provavelmente, sofrerá alterações de ordem técnica para que possa incorporar mais informações e/ou disponibilizar um conjunto maior de resultados estatísticos além dos apresentados neste trabalho.

## 9.2 Resumo de Contribuições e Pesquisas Futuras

A solução proposta neste trabalho apresentou diversas contribuições computacionais inovadoras, tais como:

- um submódulo de Impacto que utiliza Inteligência Artificial, aplicado à área de Sistemas de Apoio a Decisão;
- uma estrutura baseada em um agente autônomo e aprendizagem por reforço;
- uma função de recompensa que avalia cenários aéreos, alimentando a experiência do agente através do algoritmo *Q-Learning*, e;
- a integração com outros módulos que utilizam tecnologias diversas, como Teoria dos Grafos e Algoritmos de Fluxo Máximo.

Como contribuições na área de Transporte Aéreo, destacam-se:

- uma nova arquitetura de ferramenta ATFM, focada no cenário aéreo brasileiro para o período tático, em tempo real;
- um sistema que trabalha com medidas restritivas baseadas na espera em solo;
- uma função de recompensa que leva em conta pontos como custos financeiros e equidade, e;
- a criação de um índice que reflete o impacto gerado pelas medidas restritivas aplicadas.

O espaço aéreo da FIR-BS analisado possui cerca de 50% do fluxo de tráfego aéreo no Brasil. Assim, este trabalho apresentou uma análise de estudo de caso

com cenários comuns de congestionamento sob dados reais para a obtenção de informações de suporte à decisão para autoridades e especialistas do ATM.

A vantagem das pesquisas ATFM nacionais é desenvolver tecnologias com propriedade nacional para aplicação no gerenciamento de tráfego aéreo brasileiro. Esta experiência de sucesso contou com a integração da UnB com a indústria (Atech) e os usuários finais do sistema (CGNA, DECEA, ACC-BS), contando hoje com várias publicações sobre as tecnologias do sistema em publicações internacionais, como a *SEKE - International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering*, e algumas edições do SITRAER (Simpósio de Transporte Aéreo).

Como estudos futuros têm-se a previsão da aplicação de outras técnicas de inteligência artificial para coordenar as ações do agente, bem como, funções que verifiquem outros aspectos que afetam ou são afetados pelas medidas restritivas aplicadas. Também, pode ser elaborado um estudo de definição dinâmica de tabelas de priorização para serem utilizadas pelo módulo MAAD, quanto a configuração do MBF, dada determinada situação do cenário aéreo.

Também podem ser objetos de pesquisa: a inclusão de um módulo que sugira um controle mais justo de ordenação de decolagem das aeronaves, após a aplicação de medidas em uma Terminal, a exemplo do RBS (*Ration-by-Schedule*), utilizado nos Estados Unidos; a criação de um módulo de filtragem de cenários aéreos não tratáveis pelo SISCONFLUX, como os que são afetados por situações climáticas adversas ou acidentes aéreos; a utilização de diferentes algoritmos de aprendizagem, com testes comparativos de desempenho, e; testes envolvendo diferentes valores para  $\beta$ ,  $\delta$  e  $\gamma$ .

Outros focos do cenário também podem ser explorados, alterando a arquitetura deste trabalho, como passar a visualizar medidas restritivas por aeroportos, ou por fixos. Assim, aeronaves em vôo podem sofrer restrições de velocidade ou efetuar esperas em determinados pontos pré-estabelecidos, através de sugestões do sistema. Outras medidas restritivas também podem ser adaptadas, como o espaçamento entre aeronaves, o controle de altitude dos vôos, ou mesmo, a espera no ar.

É importante ressaltar que as medidas restritivas são informadas pelo MBF, através de algoritmos de fluxo máximo, onde a função do MAAD é sugerir esta ou qualquer outra medida restritiva informada pelo controlador de vôo. Desta forma, o agente passa a pontuar ações que, por experiência própria do controlador, não são originadas no MBF.

Como última indicação de trabalho futuro, está prevista a execução deste protótipo em um ambiente real, além de integrar todas as FIRs do Brasil, com o funcionamento do SISCONFLUX em paralelo com os procedimentos operacionais sendo realizados pelos Órgãos de Controle.



# Referências

- Agogino, A. and Tumer, K. (2009). Learning Indirect Actions in Complex Domains: Action Suggestions for Air Traffic Control. *Advances in Complex Systems (ACS)*, 12(04):493–512. 68, 73, 77
- Antunes, M. J. F. (2008). Plano de Vôo Apoiado em Sistemas de Informação Geográfica. Master's thesis, Universidade de Lisboa, Portugal, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. 8, 9
- Araújo, R. C. S. S. (2000). O Trabalho e as Práticas do Controlador de Tráfego Aéreo. Master's thesis, Faculdade de Saúde Pública da USP, São Paulo, SP, Brasil. 27, 30
- Atech, T. C. (2009). Gerenciador de Fluxo de Tráfego Aéreo SYNCROMAX. [http://www2.atech.br/Trafego\\_Aereo.atech](http://www2.atech.br/Trafego_Aereo.atech). 2, 30
- Bertsimas, D. and Gupta, S. (2009). Fairness in Air Traffic Flow Management. *INFORMS Meeting, San Diego, CA, Usa*. 32, 47, 68, 79, 80, 96
- Bonzano, A., Cunningham, P., and Meckiff, C. (1996). ISAC: A CBR System for Decision Support in Air Traffic Control. In Smith, I. and Faltings, B., editors, *Advances in Case-Based Reasoning*, pages 44–57. Springer-Verlag. Notes in AI. 32
- Camargo, G. M. (2006). Controle de Pressão Seletiva em Algoritmo Genético Aplicado a Otimização de Demanda em Infra-Estrutura Aeronáutica. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. 13, 16, 19, 20, 27, 30
- CGNA (2007). Relatório Geral. Technical report, Departamento de Controle do Espaço Aéreo, DECEA, ICA 100-22,, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 8, 23
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., and Stein, C. (2001). *Introduction to Algorithms*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, second edition. 58
- Crespo, A. M. F., Aquino, C. V., de Souza, B. B., Weigang, L., Melo, A. C. M. A., and Alves, D. P. (2007). Sistema Distribuído de Apoio a Decisão Aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego: Caso CINDACTA I. *Simpósio de Transporte Aéreo - SITRAER VI*, pages 317–327. 2, 15, 20, 28, 30, 49, 52, 100

- Crites, R. and Barto, A. (1996). Improving Elevator Performance Using Reinforcement learning. In *Advances in Neural Information Processing Systems 8*, pages 1017–1023. MIT Press. 64
- DECEA (2009). Departamento de Controle do Espaço Aéreo: Serviços de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego. <http://www.decea.gov.br/espaco-aereo/gerenciamento-de-trafego-aereo/>. 10, 15, 18, 22, 29
- DEPV (1999). Regras do Ar e Serviço de Tráfego Aéreo. MMA100-12. 16
- Dib, M. V. P. (2004). Sistema Multiagentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo em Tempo Real. Master's thesis, Universidade de Brasília - UnB. 15, 32, 37, 38, 39, 47, 48
- Dib, M. V. P., Weigang, L., and Melo, A. C. M. A. (2007). Approach of Balancing of the Negotiation among Agents in Traffic Synchronization. *Revista IEEE América Latina*, 5:338–345. 7, 22, 23, 27, 30
- Donohue, G. L. (2008). *TERMINAL CHAOS: Why U.S. Air Travel Is Broken and How to Fix It*. Amer Inst of Aeronautics and Astronautics. 1
- FAA, F. A. A. (2002). Blueprint for NAS Modernization. <http://www.faa.gov/nasarchitecture/Blueprint2002.htm>. 15
- Gomes, E. F. (2003). Aplicação da Metodologia HCI ao Ambiente Tutor Delphi. Master's thesis, Universidade Regional de Florianópolis, Florianópolis, SC, Brasil. 62
- ICEA (2007). Regras de Ar e Serviços de Tráfego Aéreo. 22, 27
- INFRAERO (2009). Movimentos nos Aeroportos. <http://www.infraero.gov.br/movi.php>. 1
- Leadbetter, D., Hussey, A., Lindsay, P., Neal, A., and Humphreys, M. (2000). Towards Model Based Prediction of Human Error Rates in Interactive Systems. 33, 34
- Monteiro, S. T. and Ribeiro, C. H. C. (2003). Aprendizagem da Navegação em Robôs Móveis a partir de Mapas obtidos Autonomamente. *XXIII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação SBC*, 1:152–152. 65
- Naufal, J. K. and Camargo Júnior, J. B. (2005). A Demand Optimization Model for Aeronautical Infrastructure. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, 1:57–68. 13, 19
- Nitto, F. H., Aguiar, R. A. B., Arruda Junior, A. C., and Weigang, L. (2009). Desenvolvimento e Avaliação da Interface do SISCONFLUX com a Utilização da Metodologia HCI. *Simpósio de Transporte Aéreo, VIII SITRAER, II RIDITA, SBTA*, 8:247–259. 4, 66, 83, 88
- Ontiveros, J. (2003). El Control Aéreo. In *Madrid*, page 192. Editora Aena. 27

- Palmer, E. M., Clausner, T. C., and Kellman, P. J. (2008). Enhancing Air Traffic Displays Via Perceptual Cues. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 5(1):1–22. 35
- Report, F. (2000). Costs of Air Transport Delay in Europe. Technical report, Institut Du Transport Aérien, Brussels, Belgium. 80
- Ribeiro, V. F., Ribeiro, W. R. J., Arruda Junior, A. C., Crespo, A. M. F., Timoszczuk, A. P., and Weigang, L. (2008). Previsão de Cenário para o Controle de Tráfego Aéreo do CINDACTA I. *Simpósio de Transporte Aéreo, VII SITRAER*. 4, 47, 51, 71
- Rolim, T. H. L., de Almeida Portela, T. A., and de Almeida Alves, T. R. (2004). O Controle do Espaço Aéreo. Technical report, Departamento de Controle do Espaço Aéreo - ASCOM/DECEA, Brasil. 2, 10, 15
- Ruble, D. A. (1997). *Practical Analysis and Design for Client/Server and GUI Systems*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA. 67
- Russel, S. and Norvig, P. (1995). *Artificial Intelligence - A Modern Approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA. 62, 63, 66
- Santos, N. (2002). Interfaces de Ambientes Educacionais: Diretrizes de Projeto. <http://magnum.ime.uerj.br/professores/neidenew/Interfaces.htm>. 4, 62
- Scardina, J. A., Simpson, T. R., and Ball, M. J. (1996). ATM: The Only Constant is Change. *Aerospace America*, pages 20–23,40. 61
- Serra, M. R. G. (2004). Aplicações de Aprendizagem por Reforço em Controle de Tráfego Veicular Urbano. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC, Brasil. 64
- Silva, A. M. G. (2001). Sistema de Simulação Acelerado para Análise de Fluxo de Tráfego Aéreo. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Ū INPE, São José dos Campos, SP, Brasil. 32, 48
- Souza, B. B., Weigang, L., and Crespo, A. M. F. (2008). Implementação de modelo para balanceamento de fluxos aplicado ao gerenciamento de tráfego aéreo. *Transportes*, 16:48–58. 10, 14, 17, 23, 27, 29
- Souza, B. B. d. (2008). Metodologia de Balanceamento Inteligente sobre Muti-fluxos para Aplicação em Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo. Master's thesis, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF, Brasil. 2, 33, 47, 54, 71, 90, 96
- Staniscia, G. F. and Filho, L. D. (2008). ATM Modernisation: Air Traffic Control Facilities in Brazil Have Undergone a Huge Modernisation and Increase in Service Capacity. *Air Traffic Technology International*, pages 74–76. 29
- Stoltz, S. and Guerreau, R. (2002). EUROCONTROL: Future ATFM Measures (FAM) Operational Concept. Technical report, EEC Note No. 13/02, Brussels, Belgium. 32

- Stoltz, S. and KY, P. (2001). Reducing Traffic Bunching Through a More Flexible Air Traffic Flow Management. Technical report, 4th USA/Europe ATM ReD Seminar, Santa Fe, New Mexico, USA. 32
- Sutton, R. S. and Barto, A. G. (1998). *Reinforcement Learning: An Introduction*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA. 40, 63
- Swenson, H., Barhydt, R., and Landis, M. (2006). Next Generation Air Transportation System (NGATS), Air Traffic Management (ATM) Airspace Project. Technical report, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA. 62
- Tesauro, G. (1995). Temporal Difference Learning and TD-Gammon. *Computers and the Humanities*, 38(3):58–68. 64
- Tumer, K. and Agogino, A. (2008). Adaptive Management of Air Traffic Flow: A Multiagent Coordination Approach. In *AAAI'08: Proceedings of the 23rd national conference on Artificial Intelligence*, pages 1581–1584. AAAI Press. 32, 47, 48, 77
- Watkins, C. (1989). *Learning From Delayed Rewards*. PhD thesis, University of Cambridge, England. 4, 47, 65, 74, 76, 97
- Weigang, L. (1994). *Knowledge-Based System for Air Traffic Flow Management: Time Table Rescheduling and Centralized Flow Control*. PhD thesis, Instituto Tecnológico Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP, Brasil. 32
- Weigang, L., Alves, C. J. P., and Omar, N. (1997). An Expert System for Air Traffic Flow Management. *Journal of Advanced Transportation*, 31(3):343–361. 32, 48
- Weigang, L., Souza, B. B., Crespo, and Alves, D. P. (2008). Decision support system in tactical air traffic flow management for air traffic flow controllers. *Journal of Air Transport Management*, 14:329–336. 7, 27, 30, 32, 48, 63, 68
- Weiss, G., editor (1999). *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA. 62
- Wolfe, S., Jarvis, P., Enomoto, F., Sierhuis, M., and Putten, B.-J. V. (2008). *A Multi-agent Simulation of Collaborative Air Traffic Flow Management*. IGI Global. 32, 42, 43, 45, 47