



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

MODELO DE BALANCEAMENTO COM MULTI-FLUXOS PARA APLICAÇÃO EM GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO AÉREO

Bueno Borges de Souza

Dissertação apresentada como requisito parcial
para conclusão do Mestrado em Informática

Orientador
Prof. Dr. Li Weigang

Brasília
2008

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

Coordenador: Prof. Dr. Li Weigang

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Li Weigang (Orientador) – CIC/UnB
Prof. Dr. Antônio Pedro Timoszczuk – ATECH
Prof.^a Dr.^a Célia Ghedini Ralha – CIC/UnB
Prof. Dr. Alexandre Gomes de Barros – ANAC

CIP – Catalogação Internacional na Publicação

Souza, Bueno Borges de.

MODELO DE BALANCEAMENTO COM MULTI-FLUXOS PARA
APLICAÇÃO EM GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO AÉREO /

Bueno Borges de Souza. Brasília : UnB, 2008.

p. : il. ; 29,5 cm.

Tese (Mestre) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

1. Teoria dos grafos, 2. Gerenciamento de Fluxo de Tráfego aéreo

CDU 004

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

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos os brasileiros que lutam para atingir uma qualificação profissional, que dedicam boa parte de suas vidas a conclusão de seus estudos e àqueles que terminam por dedicar toda uma vida com o objetivo de produzir conhecimento, muitas vezes sacrificando o relacionamento com a própria família. Dedico também a meus familiares, que suportaram minha ausência por todo o período que tive que me dedicar aos estudos.

Agradecimentos

Agradeço à *Deus*, que me deu forças quando mais precisei, ao apoio psicológico de minha mãe *Geralda Aparecida Ferreira Borges*, à toda equipe do grupo de transporte aéreo da UnB e a todos os professores da pós-graduação em Informática da UNB. Meus agradecimentos, também, ao Professor *Li Weigang* pelo apoio na condução desse trabalho, a *Hammurabi Mendes* do Departamento de Ciência da Computação pela ajuda na revisão da dissertação e a *Douglas de Sousa Ramiro da Silva* pelas orientações no uso da tecnologia Java.

“Nós deveríamos esquecer as pequenas eficiências 97% das vezes: otimização prematura é a raiz de todo mal.”

Donald E. Knuth

Resumo

Esta pesquisa descreve um sistema de auxílio a decisão com aplicação de metodologias de Teoria dos Grafos e Inteligência Artificial para dar suporte ao Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Brasileiro. Implementa-se um modelo de gerenciamento de fluxo baseado em grafos, com adaptações heurísticas, para a regulação dinâmica do fluxo. O modelo apresenta a arquitetura do Módulo de Balanceamento de Fluxo - MBF, que integra o Sistema Distribuído de Apoio a Decisão aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego (SISCONFLUX), atualmente em desenvolvimento, e tem o objetivo de propiciar informações que ajudem na melhoria do gerenciamento do espaço aéreo nacional.

O Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF) foi idealizado como um módulo do SISCONFLUX que tem a função de dar suporte ao sistema em operação no Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I) e fornecer novas informações que auxiliem o gerenciamento do processo aplicado pelos controladores neste centro. Por meio de técnicas de maximização de fluxo adaptadas da Teoria dos Grafos, o MBF aplica um modelo de análise que determina o tempo de separação entre decolagens a partir das terminais contidas na Região de Informação de Voo de Brasília (FIR-BS) e distribui a folga do fluxo ao longo do espaço aéreo controlado. O objetivo é prevenir ou reduzir o congestionamento nos diversos setores da FIR-BS.

Com a ajuda dos outros módulos do SISCONFLUX, o MBF dá suporte a regulação do fluxo de tráfego com o objetivo de auxiliar os controladores na tomada de decisão. Com o desenvolvimento dessa ferramenta os controladores podem adquirir o conhecimento que os auxilie a tomar decisões. A pesquisa também apresenta os resultados de uma simulação com duas políticas: distribuição do fluxo igualitária e priorizada. Como exemplo mostra-se que a separação dos tempos de decolagens podem ser reduzidas de 30% a 60%, dependendo da política aplicada.

Palavras-chave: Teoria dos grafos, Gerenciamento de Fluxo de Tráfego aéreo

Abstract

This research describes a decision system that uses the methodology of Graph Theory and Artificial Intelligence to support Air Traffic Flow Management in Brazilian air space. It implements a model for flow management based on graph with adapted heuristics for the regulation of the dynamic flow. The model presents the architecture of the Flow Balancing Module (FBM) and integrates with the Distributed Decision Support System Applied to Tactical Air Traffic Flow Management (SISCONFLUX), currently under development, with the objective to improve the national air space management.

The FBM is proposed to support the operation system at First Integrated Center of Air Defense and Air Traffic Control - CINDACTA I and to help and improve the management process of controllers in this center. Using the maximization flow technique of adapted Graph Theory, FBM is developed as an analysis model that determines the take-off separation time from terminals within Flight Information Region of Brasília (FIR-BS) and distributes the slack of flow along the controlled air space. The objective is to prevent or reduce congestions in diverse sectors of FIR-BS.

With the help of other modules, FBM supports the regulation of traffic flow with the objective of give extra informations to controllers and other units within the SISCONFLUX. By means of the system developed, air traffic controllers and supervisors can effectively acquire knowledge and get assistance to make better decisions. The research also presents the results of the simulation with two policies: egalitarian and prioritization distribution of the flight flow. As an example, it shows that the take-off separation time should be reduced about 30% to 60%, depending on the policy applied.

Keywords: Graph Theory, Air Traffic Flow Management

Abreviaturas

AAR - Taxa de Chegada no Aeroporto (*Airport Accepting Rate*).

ACC-BS - Centro de Controle de Área de Brasília.

AD - Atraso de Espera no Ar (*Airbone Delay*).

ADS - Sistema automático e autônomo de indicação de posição fornecido pelas aeronaves em voo.

AHP - Ponto de Espera no Ar (*Airbone Holding Point*).

ATC - Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control*).

ATFM - Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*).

ATFSM-MAS - Sistema Multi-agentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Synchronization and Management Multi-Agents System*).

AWP - Ponto de Trabalho do Aeroporto (*Airport working Point*)

CDM - Realizando Decisões Colaborativas (*Collaborative Decision Making*).

CINDACTA I - Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo.

CGNA - Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea.

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

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

FIR-BS - Região de Informação de Voo de Brasília.

GDP - Programa de Atraso em Solo (*Ground Delay Program*).

GHD - Atraso de Espera em Solo (*Ground Holding Delay*).

GHP - Ponto de Espera em Solo (*Ground Holding Point*) ou Problema de Espera em Solo (*Ground Holding Problem*).

GSH - Grade de Manipulação de Serviços (*Grid Service Handler*).

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

PBA - Padrão de Balanceamento de Aeroportos.

PAAR - Plano da Taxa de Recebimento do Aeroporto (*Planner Airport Accepting Rate*).

SGHP - Programa de Espera em Solo Aplicado a apenas um Ponto (*Single Ground Holding Program*).

SYNCRUMAX - Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo (Atech - Tecnologias Críticas).

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

Sumário

Lista de Figuras	13
Lista de Tabelas	15
Capítulo 1 Introdução	16
1.1 O Contexto	16
1.2 Objetivo	18
1.3 Metodologia	19
1.4 Organização do Trabalho	20
Capítulo 2 Descrição do Problema	22
2.1 O Gerenciamento de Tráfego Aéreo	22
2.2 Contexto Operacional	25
2.3 Problema	26
2.4 Justificativa	27
Capítulo 3 Trabalhos Correlatos	28
3.1 Abordagens em Programação Inteira	28
3.1.1 Um Modelo Matemático de auxílio ao problema de Controle do Tráfego Aéreo	28
3.1.2 Programação inteira estocástica com estrutura de rede dual e sua aplicação no Problema da Espera em Solo	31
3.2 Abordagem usando Sistemas Especialistas	33
3.2.1 Sistema Especialista para gerenciamento de tráfego aéreo	33
3.3 Abordagens em Teoria dos Grafos	33
3.3.1 <i>Modelo dinâmico de fluxo de redes para ATFM</i>	33
3.3.2 ATFM sobre grafos com aplicação de Programação Dinâmica	35
3.4 Abordagens em técnicas Multi-agente	37
3.4.1 Sistema Multi-agentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo	37
3.4.2 Um Framework para Resolução de conflitos em ATFM	40
3.5 Abordagem da proposta sugerida	42
Capítulo 4 Metodologia e Fundamentos	43
4.1 Teoria dos Grafos	43
4.1.1 Fluxo em Grafos (Redes)	45
4.2 Metodologia	49

4.2.1	Multi-fluxo e a Priorização de fluxos	49
4.2.2	Análise de ocupação	51
Capítulo 5 Modelagem		55
5.1	Visão geral	55
5.2	Arquitetura do MBF	57
5.2.1	Descrição dos submódulos	58
Capítulo 6 Implementação		63
6.1	Orientação a Objetos	63
6.2	O Ambiente de Desenvolvimento	64
6.3	O Ambiente de Execução	64
6.4	O Protótipo do Modelo	66
6.5	Implementação do Modelo	66
Capítulo 7 Experimentos e Resultados		71
7.1	Planejamento do estudo de caso	71
7.2	Caso 1: Situação de grande movimento	73
7.2.1	Variação 1: Política de distribuição igualitária	73
7.2.2	Variação 2: Política de distribuição com priorização de fluxos	73
7.3	Caso 2: Situação de baixo movimento	74
7.3.1	Variação 1: Política de distribuição igualitária	74
7.3.2	Variação 2: Política de distribuição com priorização de fluxos	75
7.4	Considerações sobre o Estudo de Caso	76
7.4.1	Validação do modelo	76
7.5	Avaliação de desempenho	76
Capítulo 8 Conclusões		78
8.1	Avaliação do modelo	79
8.2	Resumo de Contribuições e Pesquisa Futura	79
Referências		81
Apêndice A Glossário		84
Apêndice B Gráficos do CGNA		86
B.1	Dados de um dia de alto fluxo.	86
Apêndice C Gráficos do CGNA		94
C.1	Dados de um dia de baixo fluxo.	94
Apêndice D Medidas tomada pelo CGNA		102
D.1	Relatório de medidas tomadas pelo CGNA.	102

Lista de Figuras

2.1	Simplificação da subdivisão do espaço aéreo controlado.	23
2.2	Simplificação da subdivisão do espaço aéreo controlado. Fonte: [Rolim et al. 2004].	23
2.3	Regiões de Informação de Vôos (FIRs) no Brasil. Fonte: [Rolim et al. 2004].	26
3.1	Exemplo da representação dos nodos no modelo: (a) e (b) modelagem das rotas aéreas. (c) espera no ar. (d) espera em solo	34
3.2	Agentes ATC (<i>Air Traffic Control</i>). Fonte: [Dib 2004]	39
4.1	Adjacência: os vértices x e w são adjacentes pois existe a aresta (w, x)	44
4.2	Conexidade: o grafo não é conexo pois não existe um caminho ligando os vértices u e k	44
4.3	O subconjunto $\{w\} \subset V$ é um corte de vértice, pois retirando-se esse vértice temos um grafo desconexo.	45
4.4	Grafo direcionado: observe que não existe nenhum caminho a partir do vértice k	46
4.5	Apresenta uma fonte, um sorvedouro e quatro vértices intermediários.	46
4.6	Uma fonte, um sorvedouro e sete vértices intermediários. Os números representam as capacidades de cada aresta.	47
4.7	Recorte parcial da FIR-BS (adaptado do mapa gentilmente fornecido pelo CINDACTA I).	50
4.8	Multi-fluxo relacionado a parte da FIR-BS.	51
4.9	Acoplamento dos fluxos gerando o grafo completo	52
5.1	Esquema de módulos do SISCONFLUX.	56
5.2	Arquitetura do Módulo de Balanceamento de Fluxo	57
5.3	Modelo de dados relacional utilizado. Criado no <i>DBDesign 4</i>	61
6.1	Compilação e execução usando Java.	65
6.2	Organização dos pacotes do MBF.	66
6.3	Classes de persistência do MBF.	67
6.4	Classes centrais do MBF.	68
6.5	Classes para representação em grafos do MBF.	68
6.6	Classes para realizar as tarefas propostas pelo MBF.	69
6.7	Diagrama de atividade do MBF.	70
6.8	Diagrama de seqüência interna ao MBF.	70

B.1	Gráfico obtido do CGNA	86
B.2	Gráfico obtido do CGNA	87
B.3	Gráfico obtido do CGNA	87
B.4	Gráfico obtido do CGNA	88
B.5	Gráfico obtido do CGNA	88
B.6	Gráfico obtido do CGNA	89
B.7	Gráfico obtido do CGNA	89
B.8	Gráfico obtido do CGNA	90
B.9	Gráfico obtido do CGNA	90
B.10	Gráfico obtido do CGNA	91
B.11	Gráfico obtido do CGNA	91
B.12	Gráfico obtido do CGNA	92
B.13	Gráfico obtido do CGNA	92
B.14	Gráfico obtido do CGNA	93
C.1	Gráfico obtido do CGNA	94
C.2	Gráfico obtido do CGNA	95
C.3	Gráfico obtido do CGNA	95
C.4	Gráfico obtido do CGNA	96
C.5	Gráfico obtido do CGNA	96
C.6	Gráfico obtido do CGNA	97
C.7	Gráfico obtido do CGNA	97
C.8	Gráfico obtido do CGNA	98
C.9	Gráfico obtido do CGNA	98
C.10	Gráfico obtido do CGNA	99
C.11	Gráfico obtido do CGNA	99
C.12	Gráfico obtido do CGNA	100
C.13	Gráfico obtido do CGNA	100
C.14	Gráfico obtido do CGNA	101
D.1	Relatório obtido do CGNA	102
D.2	Relatório obtido do CGNA	103
D.3	Relatório obtido do CGNA	104

Lista de Tabelas

4.1	Algoritmo Básico de Ford-Fulkerson [Cormen et al. 1998]	49
4.2	Algoritmo Básico de EDMONDS-KARP [Cormen et al. 1998]	50
7.1	Distribuição da folga entre os fluxos na malha para priorização do fluxo com origem em São Paulo. A tabela que relaciona o horário possui 154 entradas e será omitida.	72
7.2	Tabela de distribuição igualitária e alta frequência para o fluxo: TMA_SP	73
7.3	Tabela de distribuição priorizada e alta frequência para o fluxo: TMA_SP	74
7.4	Tabela de distribuição igualitária e alta frequência para outros fluxos.	74
7.5	Tabela de distribuição igualitária e baixa frequência para o fluxo: TMA_SP	75
7.6	Tabela de distribuição priorizada e baixa frequência para o fluxo: TMA_SP	75
7.7	Tabela de desempenho do protótipo nos testes realizados.	77
7.8	Legenda da Tabela de desempenho do protótipo nos testes realizados.	77

Capítulo 1

Introdução

1.1 O Contexto

Tanto a FAA (*Federal Aviation Administration*) como as indústrias aeronáuticas previam um crescimento de cento e cinquenta a duzentos e cinquenta por cento durante as próximas duas décadas [Swenson et al. 2006]. Com a crise financeira nos Estados Unidos e a crise dos combustíveis essas projeções foram reduzidas, mas a AIRBUS ainda projeta um crescimento de 4,9% em média no mundo todo. Segundo Rafael Alonso, vice-presidente da fabricante europeia de aeronaves AIRBUS, mesmo com a crise norte-americana este crescimento não será afetado seriamente [EFE 2008]. Todd Benson e Chris Aspin [Benson e Aspin 2008] destacam o crescimento das linhas aéreas na América Latina mesmo com a alta de combustível.

Apesar da disparada de preço dos combustíveis, o desempenho das maiores companhias aéreas da América Latina se mantém forte. Este crescimento tem suporte na expansão das economias da região que impulsiona o crescimento do tráfego de passageiros. O crescimento econômico e conseqüente aumento da renda da população permite que milhões de pessoas possam realizar a primeira viagem aérea.

No Brasil, após dois graves acidentes e uma crise de tráfego aéreo em menos de dois anos, o mercado da aviação continua aquecido e companhias estrangeiras vêm no Brasil uma boa oportunidade de investimento [Benson e Aspin 2008]. Empresas estrangeiras como a Lufthansa (Alemanha), LAN (Peru) e TAP (Portugal) assinaram um acordo de partilha de vôos (*code-share*) com a TAM, que é considerada a principal empresa aérea do Brasil e, da mesma forma, a KLM Royal Dutch Airlines e a Air France assinaram com a Gol. Além disso, David Neeleman, fundador da JetBlue Airways, manifesta interesse em abrir uma nova companhia de baixo custo no Brasil.

A crise financeira norte-americana contrasta com a realidade brasileira. Naquele país a Delta Air Lines e a Northwest Airlines anunciaram um prejuízo conjunto de 10,5 bilhões de dólares no primeiro trimestre de 2008. No Brasil, apesar da falência da BRA e das dificuldades financeiras da OceanAir e da Varig, a TAM e a Gol continuam obtendo lucros.

Devido a esse aumento de demanda o gerenciamento de tráfego aéreo tornou-

se uma atividade ainda mais crítica. Garantir a segurança das aeronaves em vôo e, ao mesmo tempo, controlar os custos operacionais é uma tarefa complexa que exige decisões precisas e uma análise profunda das conseqüências dessas decisões.

O serviço de gerenciamento de tráfego aéreo dispõe da visualização de dados tratados por radares fixos e transportáveis, visualização de síntese multiradar e tratamento de planos de vôos – a síntese multiradar tem a finalidade de converter e integrar o formato das mensagens (protocolo) de diferentes tipos de radares da área terminal ao Sistema de Tratamento e Visualização de Dados (STVD). Este serviço permite também: a troca de informações com centros adjacentes, a emissão de alertas de colisão *ar-terra* e *ar-ar*, a visualização de imagens meteorológicas sobrepostas por *vídeo-mapas* e *strips* eletrônicas com informações sobre os planos de vôos. Essa massa de dados fica sob responsabilidade dos operadores de controle de tráfego aéreo [Dib 2004, Crespo et al. 2007], que tomam decisões cabíveis em função do plano de vôo das aeronaves [Sekhavat e Sastry 1998]. A carga de trabalho imposta sobre estes profissionais é elevada e, com o objetivo de regular essa carga, existem diretrizes operacionais e legais que delimitam as condições de trabalho desses operadores. Para garantir que os limites estabelecidos não sejam ultrapassados estabelece-se um conjunto de medidas restritivas de controle de fluxo.

Há diversos fatores que contribuíram para a crise instalada no setor de transporte aeroviário brasileiro em 2007. Um desses fatores está associado à forma empírica como são aplicadas medidas restritivas [Crespo et al. 2007]. A escolha das técnicas e a dosagem dessas medidas restritivas são estabelecidas segundo a experiência dos controladores nas funções de operador e supervisor. O número de variáveis envolvidas neste processo é elevado e uma decisão empírica é parcialmente eficaz. Conclui-se que existe margem para a otimização do fluxo de tráfego mediante o aumento da eficiência das medidas restritivas aplicadas. A escolha sistemática das medidas adequadas pode contribuir para o aumento dessa eficiência.

Desde 2006, as medidas restritivas estão sendo determinadas com o auxílio do Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea (CGNA). O CGNA dispõe de ferramentas que realizam diversas análises baseadas em estudos estatísticos e previsões advindas do Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo (SYNCROMAX). O SYNCROMAX é uma solução desenvolvida pela *Atech Tecnologias Críticas* e está em operação no CGNA, no Rio de Janeiro [Staniscia e Filho 2008]. O sistema disponibiliza um conjunto de informações úteis para auxiliar a tomada de decisão dos operadores. Com base nessas informações, é possível determinar um abrangente leque de medidas para atender cenários estratégicos, táticos e operacionais – estes cenários são construídos baseando-se nos planos de vôos repetitivos em um horizonte de quinze horas antes das decolagens. O SYNCROMAX disponibiliza aos operadores, através de um conjunto amigável de interfaces homem-máquina, informações seguras e precisas relativas à respectiva área, em formato gráfico, que abrange: a análise do desequilíbrio entre capacidade e demanda no uso do espaço aéreo; os dados relativos a planos de vôos para planejamento estratégico; a centralização do planejamento desses planos e a posterior distribuição aos centros regionais [ATECH 2007].

Há previsão da integração de dados relativos às condições meteorológicas e

informações aeronáuticas, assim como dados em tempo real sobre o cenário do espaço aéreo proveniente de radares e de sistemas de vigilância cooperativa automática (ADS - *Automatic Dependent Surveillance*) [ATECH 2007]. A integração dessas informações e a apresentação coerente e organizada aos operadores, com a finalidade de dar suporte aos procedimentos e medidas de regulação, são de fundamental importância para o tratamento da gerência do fluxo aéreo.

Apesar das facilidades fornecidas pelo sistema, as decisões tomadas com o auxílio do SYNCROMAX ainda são fundamentadas nos planos de vôos repetitivos apresentados na fase estratégica e não incluem eventos ocorridos após a decolagem da aeronave, ou seja, desconsidera-se a real evolução do fluxo de tráfego no espaço aéreo [Crespo et al. 2007]. Constata-se que ainda existe margem para melhorar o gerenciamento do fluxo de tráfego através da análise em tempo real pós-decolagem.

No conjunto de ferramentas usadas no controle de tráfego aéreo não há uma especificamente voltada para o gerenciamento tático e a sincronização do fluxo. Essa carência fica evidente quando ocorrem cenários que apresentam diminuição dos recursos de controle ou fatores que causem modificações significativas no fluxo esperado, tais como: fenômenos meteorológicos, incidentes e/ou acidentes aeronáuticos, saturação de setores com aeronaves em vôo – o espaço aéreo é dividido em setores de controle e existe um grupo de controladores: controlador, assistente e supervisor, que supervisionam as aeronaves dentro desses setores. Dentro de um setor é permitida a presença de um número máximo de aeronaves e quando esse valor é atingido diz-se que o setor está *saturado*.

1.2 Objetivo

Diante do que foi apresentado, fica clara a importância estratégica e econômica atribuída ao desenvolvimento de um sistema que possibilite o estabelecimento mais preciso de medidas restritivas de controle de fluxo. Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para realizar o balanceamento de carga na ocupação dos setores aéreos e implementar um subsistema integrado ao Sistema de Apoio à Decisão aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego (SISCONFLUX), em fase de projeto pelo CINDACTA I e pela Universidade de Brasília (UnB), que auxilie os controladores no gerenciamento das medidas de controle de fluxo de tráfego aéreo; além disso, apresentar um modelo de análise de fluxo segundo as bases da Teoria dos Grafos, que possibilite essa gerência do fluxo de tráfego.

O Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF), foco principal deste trabalho, será descrito em detalhes no Capítulo 5 e usa uma representação abstrata do multifluxo interno aos setores de controle do espaço aéreo sob jurisdição do CINDACTA I. Tem como tarefa principal analisar os fluxos que integram a malha aérea da região de informação de vôo de Brasília e propor taxas de entrada para tais fluxos que respeitem as limitações da malha e aumente o fluxo. Para isso, tomará como base a previsão de cenário e da distribuição da capacidade de cada setor, um conjunto de rotas válidas e o conjunto de possíveis aeronaves que ocuparão esse cenário.

Pode-se destacar como objetivos gerais dessa pesquisa:

1. Auxiliar a determinação de medidas restritivas que assegurem o fluxo de aeronaves adequado às necessidades dos serviços aéreos.
2. Reduzir a carga de trabalho imposta aos controladores de voo.
3. Permitir a priorização de determinados fluxos aéreos.

Pode-se destacar como objetivos específicos dessa pesquisa:

1. A definição de uma metodologia de solução para o problema e a implementação de um protótipo que realize essa metodologia.
2. A definição de políticas de distribuição que possam ser aplicadas no modelo: uma política igualitária e outra priorizada.
3. A definição de uma metodologia de desenvolvimento e a implementação do modelo.
4. A coleta de dados reais advindos do CINDACTA I e a realização do diagnóstico do problema de balanceamento.
5. A realização de simulações com o modelo, utilizando dados reais e a avaliação do modelo desenvolvido.

1.3 Metodologia

Nesta pesquisa seguiram-se duas metodologias: uma de solução e outra de desenvolvimento. Na metodologia de solução utilizou-se Teoria dos grafos, especificamente nos conceitos de maximização de fluxos e técnicas de Inteligência Artificial no que tange o uso de técnicas de solução por pesquisa sobre grafos.

Algumas idéias da técnica de representação por grafos foram retiradas dos trabalhos [Zhang et al. 2005] e [Peng et al. 2001], porém muitas das técnicas a serem apresentadas não foram utilizadas por esses autores, visto que os mesmos não utilizaram algoritmos de maximização de fluxo. Diferentemente desses trabalhos, utilizou-se neste modelo algoritmos de obtenção do caminho mínimo em grafos, devido a Dijkstra [Cormen et al. 1998], algoritmos de busca em amplitude [Russell e Norvig 2004] e algoritmos de maximização de fluxo, devido a Edmonds e Karp [Cormen et al. 1998]. Destaca-se também o algoritmo de construção de grafos a partir das rotas, que utiliza uma representação matricial esparsa para converter rotas sequenciais a partir de uma terminal para um grafo com origem nessa terminal.

Como o módulo faz parte de um sistema e necessita de informações oriundas de outros módulos do sistema, foi necessária a criação de um conjunto de classes simuladoras com o objetivo de simular a execução das tarefas destes módulos. A metodologia de desenvolvimento inclui a implementação de um protótipo que, com a ajuda das classes simuladoras, executa o ajuste em situações típicas, computa as taxas efetivamente praticadas utilizando uma base de dados real fornecida pelo

CINDACTA I e tabula esses resultados. Esses resultados são apresentados no Capítulo 7. A modelagem do sistema foi feita com o uso da linguagem orientada a objetos UML (Unified Modeling Language). Na implementação utilizou-se a plataforma Java (Sun Microsystems, versão 1.5) visando compatibilidade com o sistema SYNCROMAX, e o banco de dados relacional MySQL 5.0.45.

O modelo foi avaliado sob dois casos distintos: um representa um dia de alta movimentação aérea e o outro um dia de baixa movimentação. Os termos “alta” e “baixa” movimentação referem-se à frequência com que as aeronaves foram incluídas na malha aérea. Um dia típico de alta movimentação, segundo as autoridades do CINDACTA I, é a quinta-feira e um dia de baixa movimentação seria bem representado pelo sábado, no entanto, devido à coleta de dados ter sido feita na semana do feriado de primeiro de maio, que foi em uma quinta-feira, essas características de “alta” e “baixa” movimentação foram transferidas para os dias anteriores, isto é, a quarta-feira e a sexta-feira. Por isso, a análise se deu nesses dois dias. Aplicou-se em cada caso as distribuições igualitárias e priorizadas, na última a priorização foi aplicada beneficiando a terminal de São Paulo, onde o fluxo de aeronaves é, normalmente, mais acentuado.

1.4 Organização do Trabalho

A primeira etapa, neste trabalho, foi dedicada ao planejamento da pesquisa dentro da área de estudo, a fim de adquirir subsídios teóricos e científicos suficientes para o cumprimento dos objetivos estabelecidos na seção anterior.

Numa etapa seguinte, foram efetuadas pesquisas e levantamento dos estudos, metodologias e técnicas utilizadas na solução de problemas similares, por meio de revisão bibliográfica, para dar fundamentação teórica ao trabalho proposto, bem como compreender o estado da arte. O trabalho é composto de oito capítulos, conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1 apresenta uma visão geral sobre o trabalho desenvolvido, abrangendo os objetivos, a motivação, a metodologia utilizada e uma breve descrição da estrutura desta dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma descrição geral sobre o gerenciamento de tráfego aéreo, dá uma visão geral sobre o contexto operacional, apresenta o problema e justifica a necessidade da solução desse problema.

O Capítulo 3 faz a revisão da literatura e apresenta o estado da arte, descrevendo vários estudos pertinentes ao trabalho proposto, problemas e soluções. O enfoque maior é dado às técnicas e pesquisas relevantes relativas ao gerenciamento de tráfego aéreo, por ser o ramo de pesquisa onde se concentra este trabalho.

O Capítulo 4 apresenta conceitos pertinentes à solução proposta e descreve a metodologia utilizada sob a luz desses conceitos.

O Capítulo 5 apresenta a modelagem do protótipo do módulo que aplica a metodologia proposta. Descreve as funcionalidades dos submódulos e apresenta os principais algoritmos utilizados.

O Capítulo 6 expõe em detalhe a implementação do modelo proposto, descrevendo o protótipo, o ambiente de desenvolvimento, o banco de dados e os submódulos.

O Capítulo 7 apresenta os experimentos realizados com o protótipo, bem como as análises comentadas dos resultados obtidos.

O Capítulo 8 contém as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas e os apêndices.

O apêndice A contém um glossário para auxiliar a compreensão dos conceitos utilizados; nos Apêndices B e C, estão os gráficos de *demanda* \times *capacidade* obtidos do controle de tráfego referentes aos dias analisados e no Apêndice D o relatório das restrições de fluxo impostas pelo controle para esses dias.

Capítulo 2

Descrição do Problema

2.1 O Gerenciamento de Tráfego Aéreo

O Gerenciamento de Tráfego Aéreo ou *Air Traffic Management* (ATM) é uma atividade composta de diversos segmentos que desenvolvem processos específicos, cooperativos e simultâneos. O principal objetivo do Gerenciamento de Tráfego Aéreo 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 [Rolim et al. 2004]. Esse gerenciamento deve considerar as limitações das aeronaves, que devem manter uma separação mínima a fim de evitar a esteira de turbulência. O Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo ou *Air Traffic Flow Management* (ATFM) realiza estudos que possam indicar uma expectativa de sobrecarga na infra-estrutura instalada e, detectada a sobrecarga, ativa procedimentos de ajuste de fluxo.

O ATM no Brasil está baseado em normas e métodos recomendados pela Organização de Aviação Civil Internacional (OACI). O ATM subdivide-se em: Gerenciamento do Espaço Aéreo, Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo e Serviços de Tráfego Aéreo [Rolim et al. 2004].

Os Serviços de Tráfego Aéreo consistem na inter-relação entre operador e piloto da aeronave, abrange o uso dos recursos de comunicação entre pilotos e operadores. São serviços como o que procura manter a distância mínima entre aeronaves, a divulgação de informações de vôo, de alerta e o serviço de resgate.

O Gerenciamento do Espaço Aéreo busca o uso flexível dos espaços aéreos com o objetivo de aumentar a sua capacidade, a eficiência e a flexibilidade operacional das aeronaves. Para permitir uma gerência mais eficaz o espaço aéreo é dividido em:

1. *Espaço Aéreo Controlado*: Ambiente conhecido e em condições de receber o Controle de Tráfego Aéreo. Possui aerovias (AWY), áreas de controle (TMA) e zonas de controle (CTR), na Figura 2.1 apresenta-se uma visão em duas dimensões simplificada da divisão do espaço. Esta divisão também considera a altitude, como mostra a Figura 2.2. De fato, ainda são definidas outras áreas como a Área Superior de Controle (UTA), a Área de Controle (CTA) e as Zonas de Tráfego de Aeródromo (ATZ) que foram suprimidas,

pois não se deseja uma compreensão tão detalhada da divisão do espaço aéreo. As áreas denominadas Setor 1, 2 e 3 são subdivisões do espaço em setores de controle.

2. *Espaço Aéreo Não-Controlado*: Não há controle de tráfego, somente serviços de informação de voo e de alerta.
3. *Espaço Aéreo Condicionado*: Define ambientes específicos. Atividades como lançamento de foguetes, balões de sondagem, treinamento de aeronaves militares, tiro, ensaios em voo e outras.

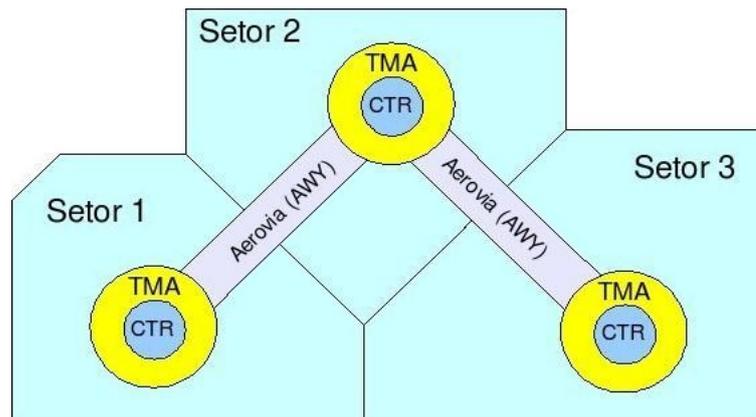


Figura 2.1: Simplificação da subdivisão do espaço aéreo controlado.

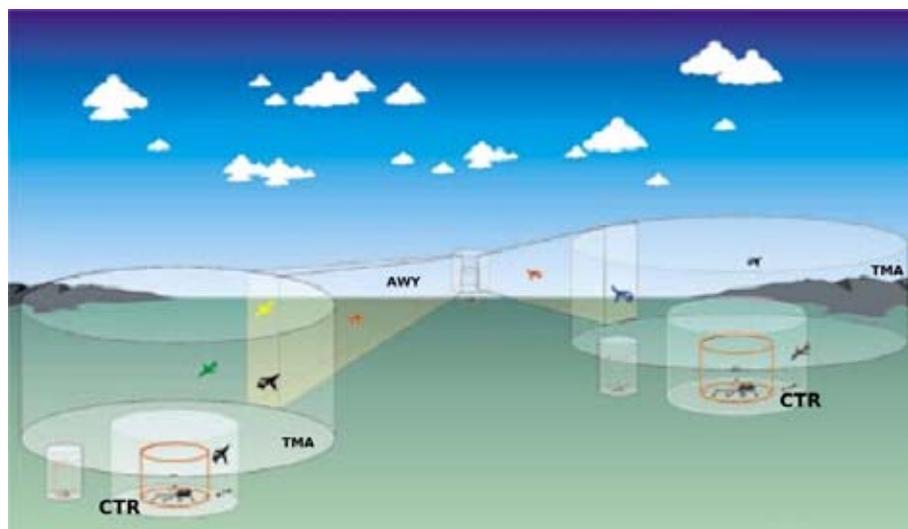


Figura 2.2: Simplificação da subdivisão do espaço aéreo controlado. Fonte: [Rolim et al. 2004].

O ATFM consiste em adotar ações necessárias para a regulação do fluxo levando-se em conta as três fases de planejamento: Planejamento Estratégico, Planejamento Pré-tático e Operações Táticas. O Planejamento Estratégico é desenvolvido pelo Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea (CGNA), com o

apoio das células de fluxo denominadas CINDACTA. O Planejamento estratégico envolve um conjunto de ações coordenadas com as prestadoras de serviços aeroportuários. Consiste no exame, com mais de vinte e quatro horas de antecedência, da relação capacidade/demanda para um determinado período de tempo e na determinação das medidas conjuntas necessárias para a resolução do desbalanceamento.

O Planejamento pré-tático tem início nas vinte e quatro horas que antecedem a utilização do espaço e considera alterações na infra-estrutura aeronáutica e aeroportuária, condições meteorológicas e a demanda do tráfego aéreo. As Operações Táticas são as ações que ocorrem durante a efetiva utilização do espaço aéreo. Consiste de ações necessárias, dentro de um horizonte de planejamento de seis horas, onde se avalia a possibilidade de ocorrência de eventos, diante de situações imprevisíveis (condições meteorológicas, falhas de equipamentos). Nessa fase ocorre o monitoramento da evolução na situação do tráfego aéreo para garantir os efeitos desejados sob influência das medidas aplicadas [Rolim et al. 2004, Crespo et al. 2007].

O Controle de Tráfego Aéreo ou *Air Traffic Control* (ATC) é um serviço prestado por controladores, em terra, que orientam aeronaves (geralmente aviões) no ar e no solo, para propiciar um fluxo de tráfego seguro, ordenado e rápido. Os Controladores de tráfego aéreo provêm indicações e autorizações de vôo, de acordo com as características operacionais das aeronaves e as condições de tráfego em determinado momento. Estas autorizações podem incidir sobre a rota, altitude e/ou velocidade propostas pelo operador da aeronave devendo os pilotos cumprir as instruções/autorizações recebidas [DECEA 2006].

O Controle de Tráfego Aéreo é prestado em órgãos de controle como uma torre de controle de um aeródromo onde os controladores de tráfego aéreo são responsáveis pela circulação de pessoas e veículos nas áreas de manobra, como as pistas e os caminhos de circulação (pistas de táxi), além de controlar os pousos, as decolagens e o deslocamento interno nos aeródromos. Outro exemplo de órgão de controle são os Centros de Controle de Aérea, 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 (aterriagem). E, ainda, os controles de aproximação que controlam as chegadas e as saídas de uma região de controle chamada Terminal, que pode conter um ou mais aeródromos[DECEA 2006].

A necessidade de melhorar a gerência do fluxo de tráfego aéreo brasileiro ficou evidenciada e passou a ter um maior destaque na imprensa a partir do acidente que vitimou cento e cinquenta e quatro pessoas, ocorrido em 29 de setembro de 2006, e a crise do sistema de controle de tráfego aéreo com a paralisação parcial do serviço nos meses seguintes ao acidente. Isto aumentou a preocupação com a segurança e com a eficiência de sistemas críticos utilizados no controle de tráfego aéreo.

O domínio da gerência ATM tem particularidades que necessitam ser exploradas com cuidado. A existência de uma legislação específica que regula as regras ATC no Brasil e no exterior define um conjunto de regras que devem ser obedecidas. Deve-se incluir estas regras nas estratégias a serem definidas para a elaboração do ambiente no qual os agentes que participam do processo de gerência do tráfego atuarão.

Os Controladores de Tráfego Aéreo utilizam regras e padrões definidos e aprovados pelas entidades aeronáuticas nacionais e internacionais, que regulamentam a circulação do tráfego aéreo[DECEA 2006]. A resolução de conflitos dos horários é realizada antes e durante o traslado da aeronave. Isto, além de se tornar um fator de grande risco para os usuários do transporte, é um fator de sobrecarga dos controladores. Se for possível a resolução antecipada, otimizada e automática desses conflitos, ter-se-á uma probabilidade menor de que uma aeronave seja retida em pleno vôo aguardando autorização de pouso (órbita), a redução dos tempos de atraso e maior economia de recursos disponíveis como consumo combustível e ocupação do espaço aéreo.

2.2 Contexto Operacional

O espaço aéreo brasileiro está dividido em quatro Regiões de Informação de Vôo¹ (FIR) como mostra a Figura 2.3, cada qual sob responsabilidade de um Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Espaço Aéreo (CINDACTA). O CINDACTA I, sediado em Brasília-DF, foi o primeiro Centro do SISDACTA (Sistema de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo) a ser instalado. Com jurisdição sobre o quadrilátero formado pelos aeroportos do Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte e Brasília. O Centro de Controle de Área de Brasília (ACC-BS), lotado no CINDACTA I, comporta cerca de cinquenta por cento do fluxo de tráfego aéreo no Brasil [CGNA 2005]. O ACC-BS dispõe de um conjunto de sistemas capazes de realizar um adequado controle dos movimentos aéreos na sua área de responsabilidade. No entanto, não há um sistema especificamente voltado para o gerenciamento tático e a sincronização do fluxo de tráfego na ocorrência de cenários onde se verifica a degradação dos meios de controle ou outros fatores que causem modificações significativas no fluxo de tráfego esperado. A degradação dos meios de controle de tráfego, assim como os demais fatores capazes de modificar o fluxo de tráfego esperado, pode levar à saturação dos setores de controle [Crespo et al. 2007]. A saturação de um setor pode ser influenciada por diversos fatores tais como: as dimensões do setor, a sua posição geográfica e o horário do dia.

As medidas restritivas ao fluxo de tráfego são aplicadas com a finalidade de atender às prescrições regulamentares. Uma dessas prescrições determina um limite superior no número de aeronaves acompanhadas pelos controladores (principal e auxiliar). As medidas, como um todo, têm severo impacto sobre todas as atividades operacionais e aeroportuárias. 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. A eficácia dessas medidas é parcial, visto que o número de variáveis envolvidas neste processo é bastante elevado. Pode-se melhorar o fluxo de tráfego mediante o aumento da eficácia e eficiência das medidas restritivas aplicadas e isto pode ser feito mediante a escolha sistematizada da medida mais adequada, considerando-se a série de variáveis envolvidas, tais como: a capacidade dos setores de controle, a dimensão dos setores de controle, a demanda por aeroporto, o desempenho das aeronaves, a necessidade de

¹A FIR Atlântico também é de responsabilidade da FIR Recife.



Figura 2.3: Regiões de Informação de Vôos (FIRs) no Brasil. Fonte: [Rolim et al. 2004].

priorização de aeroportos, a necessidade de priorização de rotas, a disponibilidade de pessoal, as restrições meteorológicas dentre outras [Crespo et al. 2007].

2.3 Problema

As medidas restritivas aplicadas em situações imprevisíveis baseadas nos planos de vôos previstos (pela consulta ao CGNA) e numa análise empírica dos controladores de serviço, não possuem seu impacto avaliado em setores vizinhos, por qualquer tipo de suporte computacional de apoio à decisão. Como consequência, não há um nível adequado de previsibilidade acerca dos efeitos das medidas restritivas adotadas sobre a demanda de fluxo de tráfego da FIR-BS como um todo e as melhores práticas não são documentadas e armazenadas para auxiliar a decisão em situações similares. Sendo assim, e considerando que a FIR-BS acomoda cerca de cinquenta por cento do volume de tráfego aéreo (vôos regulares) no Brasil, o dimensionamento inadequado das medidas aplicadas pelo ACC-BS implicará em problemas de fluxo de tráfego em todo o espaço aéreo nacional [Crespo et al. 2007].

Como dosar essas medidas adequadamente? Quais parâmetros precisam-se considerar? Como ajustar esse fluxo de maneira que determinados terminais sejam priorizados na utilização das capacidades dos setores? Estas são perguntas que este trabalho pretende responder.

2.4 Justificativa

No contexto da crise instalada no setor de transporte aeroviário brasileiro, existem diversos fatores que contribuíram para a crise. Um desses fatores está associado aos problemas narrados anteriormente. A aplicação mais eficaz das medidas restritivas de fluxo de tráfego obtidas com o auxílio de ferramentas computacionais orientadas por metodologias adequadas às necessidades operacionais dos centros de controle pode reduzir o impacto dessas medidas, propiciando um melhor uso dos recursos aeroviários, reduzindo a carga de trabalho e a tensão dos controladores, reduzindo os atrasos nos aeroportos, reduzindo os gastos das empresas aéreas (com: combustível, desgaste do pessoal e dos equipamentos), dentre outras vantagens que direta ou indiretamente seriam produzidas.

Além dos ganhos econômicos e sociais podemos ainda ressaltar a contribuição para a evolução das pesquisas em transporte aéreo e nas técnicas de gerenciamento de fluxo.

Capítulo 3

Trabalhos Correlatos

Alguns trabalhos já foram realizados com o objetivo de melhorar o gerenciamento de fluxo do tráfego aéreo no Brasil e no mundo. As soluções apresentam modelos que usam sistemas especialistas [Weigang 1994], técnicas de programação dinâmica [Zhang et al. 2005], técnicas de programação linear inteira [Rizzi 2003, Ball et al. 2003, Mukherjee 2004], soluções distribuídas com o uso de técnicas multi-agentes [Dib 2004, Heymann et al. 2003], aprendizagem por reforço [Alves et al. 2006] dentre outras técnicas. Neste capítulo será dada uma visão geral desses modelos objetivando uma melhor compreensão da metodologia empregada e aplicada para solução do problema. A subseção 3.1.1 terá um enfoque um pouco mais detalhado para dar uma noção da complexidade de uma solução em programação inteira, as demais serão apresentadas de maneira informal visando uma apresentação mais sucinta.

3.1 Abordagens em Programação Inteira

3.1.1 Um Modelo Matemático de auxílio ao problema de Controle do Tráfego Aéreo

É um modelo matemático desenvolvido para balancear a demanda de tráfego aéreo com base nas capacidades dos setores de controle [Rizzi 2003]. Tem como foco a otimização desse balanceamento usando programação linear inteira. Modelado para atuar até doze horas antes do voo, ele subdivide esse período em intervalos de um minuto. Os voos são caracterizados pelos setores contidos em seu plano de voo e intervalos de tempo planejados para ocupação desses setores. Os setores são caracterizados pela capacidade que indica o número de aeronaves que podem estar ocupando o setor simultaneamente. O modelo procura balancear *capacidade* \times *demanda* pelo ajuste dos horários de decolagem na origem da demanda, isto é, nos aeroportos de origem das aeronaves. Define-se então para cada voo um coeficiente expresso em função dos atrasos sofridos pelos voos e, sobre esses coeficientes, uma *função objetivo* que deverá ser maximizada pelo algoritmo sugerido no modelo. A função objetivo apresenta uma formulação matemática descrita na equação 3.1.

$$Max \sum_{n \in N(a)} \left\{ \sum_{f \in F(n)} \left\{ \sum_{t \in T_f} (Coeft_t \times X_{f,t}^n) \right\} \right\} \quad (3.1)$$

A função objetivo maximiza a premiação do vôo f de acordo com o atraso imposto a esse vôo. Sobre esta função objetivo exigem-se as seguintes condições:

$$\sum_{f \in F(n)} X_{f,t}^n \leq C_{n,t} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (3.2)$$

A restrição 3.2 força o modelo a respeitar a capacidade de pouso e decolagem dos aeroportos.

$$\sum_{f \in F(s)} \left(\sum_{t-tfvss \leq t^* \leq t-tfves} X_{f,t^*}^s \right) \leq K_{s,t}, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (3.3)$$

A restrição 3.3 impede que a capacidade dos setores sejam ultrapassadas.

$$\sum_{t \in T} X_{f,t}^n = 1, \quad \forall n \in N, \forall f \in F(n) \quad (3.4)$$

A restrição 3.4 garante que um vôo tem alocado para si apenas um horário e local de decolagem.

$$\sum_{t \in T_f} X_{f,t}^n = 1, \quad \forall n \in N(a), \forall f \in F(n) \quad (3.5)$$

A restrição 3.5 garante que um vôo tem alocado para si apenas um horário e local de pouso.

$$\sum_{t-tfvss \leq t^* \leq t-tfves} X_{f,t^*}^s = 1, \quad \forall f \in F, \forall s \in S(f) \quad (3.6)$$

A restrição 3.6 garante que um vôo ocupa apenas um setor em um dado instante.

$$X_{f,t+\Delta t}^{n+1} - X_{f,t}^n = 0, \quad \forall f \in F, \forall s \in S(f), \forall t \in T \quad (3.7)$$

A restrição 3.7 estabelece que o vôo sempre passará de um setor n para o setor $n + 1$, ambos os setores constando na rota prevista do plano de vôo da aeronave.

$$X_{f,t}^n \in 0, 1, \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (3.8)$$

A restrição 3.8 garante que duas aeronaves nunca ficarão no mesmo nó.

Dentro dessas equações considera-se:

- T é o conjunto de intervalos de tempo com ($t \in T$);
- S é o conjunto de setores com ($s \in S$);
- $S(f)$ é o conjunto de setores s que o vôo f sobrevoa;
- N é o conjunto de nós com ($n \in N$);

- $N(a)$ é um conjunto de nós de aeroportos destino;
- F é o conjunto de Vôos com ($f \in F$);
- $F(s)$ é o conjunto de vôos que sobrevoa o setor s ;
- $F(n)$ é o conjunto de vôos que tem o nó n no seu plano de vôo;
- $K_{s,t}$ é a capacidade do setor s , no tempo t , para todo $s \in S$ e para todo $t \in T$;
- $C_{n,t}$ é a capacidade do nó n , no tempo t , para todo $n \in N$ e para todo $t \in T$;
- rf é o horário programado de chegada do vôo f ;
- $tfvss$ é o tempo do vôo f necessário para sair do setor s ;
- $tfves$ é o tempo do vôo f necessário para entrar no setor s ;
- t^* é o instante de tempo candidato para a decolagem do vôo f ;
- $Coeff_t$ é a premiação na função objetivo do vôo f , de acordo com o atraso imposto ao vôo f ;
- $n + 1$ é o nó subsequente de n de acordo com o plano do vôo f ;
- Δt é o intervalo de tempo necessário para que o vôo f saia do nó n e chegue no nó $n + 1$;
- T_f é o conjunto de intervalos de tempo que o vôo f pode pousar ($T_f = r_f, \cdot, r_f + \Delta_{max}$);
- Δ_{max} é o número máximo de intervalos de tempo que o vôo f pode sofrer de atraso;
- $X_{f,t}^n = 1$ se o vôo f chegar no nó n , no tempo t e 0 em caso contrário;
- $X_{f,t^*}^s = 1$ se o vôo f , estiver no setor s , no tempo t e 0 em caso contrário;

O coeficiente de premiação $Coeff_t$ aumenta conforme o atraso em relação ao horário original diminui, seguindo a equação 3.9. Na medida em que o horário de partida se afasta do horário original esse coeficiente força a função objetivo para valores menores que induz a alocação desse vôo em relação a outro.

$$Coeff_t = Coefbase - \sum_{i=1}^t \left[(Coef1)^i \times \frac{Coef2}{100} \times Coefbase \right] \quad (3.9)$$

Onde,

- $Coeff_t$ é a premiação do vôo f de acordo com seu atraso t .
- $Coefbase$, $Coef1$ e $Coef2$ são constantes.

- $t \in [1, \Delta_{max}]$ é o número de intervalos que o vôo pode ser atrasado com Δ_{max} o máximo atraso permitido ao vôo.

Os valores das constantes (*Coefbase*; *Coef1*; *Coef2*) foram escolhidas de forma a forçar o decrescimento. Estes valores foram definidos como (3000; 1, 10; 1, 05). Segundo o autor, nenhum estudo mais aprofundado foi realizado para definição desses valores [Rizzi 2003].

A priorização das aeronaves em rota é um fator considerado preponderante pelo modelo. Os algoritmos sugeridos são os conhecidos em programação linear como *branch and bound* (bifurcação e limite). Nenhum algoritmo foi explicitamente descrito, porém o autor trabalhou com metodologias baseadas em simulações, heurísticas e algoritmos ótimos. Este último considerado de custo computacional (tempo) elevado.

3.1.2 Programação inteira estocástica com estrutura de rede dual e sua aplicação no Problema da Espera em Solo

Do título original *A Stochastic Integer Program with Dual Network Structure and its Application to the Ground Holding Problem* este trabalho tem o objetivo de resolver o problema da espera em solo ou *Ground Holding Problem* (GHP) em inglês. Naturalmente é vantajoso manter-se a aeronave no solo quando se sabe que ela terá de fazer uma espera no ar ou *Airbone Holding Point* (AHP) então o problema da espera em solo procura determinar quanto tempo a aeronave deve esperar de modo que não precise realizar uma AHP.

Este artigo apresenta uma generalização do modelo clássico de fluxo de redes. Essa generalização envolve a substituição de uma demanda determinística por uma demanda estocástica (O autor não apresentou um modelo de escolhas probabilísticas, mas relacionou a solução com a natureza estocástica do problema). O artigo mostra ainda que a matriz gerada pelo modelo estocástico é dual, dessa forma a programação inteira associada ao modelo estocástico pode ser resolvido de maneira eficiente usando o modelo clássico de fluxo de redes e técnicas de programação linear [Ball et al. 2003].

O artigo apresenta uma aplicação desse modelo no problema de espera em solo (*Ground Holding Problem* - GHP) relativo ao gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. O autor afirma que esse modelo permite uma integração facilitada aos procedimentos do paradigma de decisões colaborativas (*Collaborative Decision Making* - CDM), um processo que envolve substancialmente a interação entre linhas aéreas e a FAA (Federal Aviation Administration) [Ball et al. 2003], pois associa elementos necessários e já presentes nos processos em execução nas empresas aéreas ao sistema de controle de tráfego. Os horários de decolagens são computados subtraindo-se do horário de chegada estimado, o tempo da viagem.

A função objetivo tenta minimizar uma relação linear entre produção e demanda do fluxo sobre um modelo clássico de fluxo de redes baseando-se em um conjunto de nós de origem e um conjunto de nós de destino.

Nos modelos anteriores, os GDPs (*Ground Delay Programs*) trabalhavam com um vetor AAR (*Airport Accepting Rate*) de predição único (A_1, A_2, \dots, A_T) onde

A_i é a capacidade prevista para a i -ésima hora. Estas previsões apresentam um alto grau de incerteza devido a natureza estocástica do problema. O modelo de programação estocástica definido no trabalho de Odoni [Richetta e Odoni 1993] adiciona um conjunto de vetores prováveis para cada hora, cada vetor tem uma probabilidade associada. Utilizando estes vetores como entrada, o modelo de Odoni [Richetta e Odoni 1993] atribui um vetor de pousos para os vôos individualmente. Dessa forma, o modelo é inválido considerando-se as regras da CDM, pois a associação de um *slot* de tempo para um vôo é resultado de um processo da interação entra a FAA e as empresas aéreas.

É interessante ao CDM o recebimento de um vetor de capacidade para cada hora, então propõe-se uma “conversão” do multi-vetor em um vetor de previsão padrão *Planner AAR* (PAAR) para ser enviado ao aeroporto destino.

Afirma-se no artigo que a chave do balanceamento entre a espera em solo (GHD) e espera no ar (AHD) é dado por dois parâmetros: g o custo por unidade de tempo para espera em solo e a o custo por unidade de tempo para espera em rota. Assume-se obviamente que $a > g$, caso contrário a melhor solução é enviar os aviões aos seus destinos o quanto antes. Como principais referências para este trabalho, o autor destaca a tese de Hoffman [Hoffman 1997] e Rifkin [Rifkin 1998], mas apresenta diversas distinções dos modelos anteriores:

1. A saída do programa é a taxa agregada de vôos que chegarão no aeroporto em cada hora, diferentemente dos controles individuais para cada vôo dos trabalhos anteriores. Isto vai ao encontro dos esquemas adotados pelo sistema colaborativo CDM.
2. A matriz de restrições da programação inteira (PI) é totalmente unimodular, o que implica em uma garantia de relaxamento da programação linear para obtenção dessa solução.
3. O uso de variáveis de vôos agregados produzem um modelo mais compacto que pode ser resolvido mais rapidamente que o modelo de Richeta e Odoni [Richetta e Odoni 1993].

Nos resultados teóricos foram analisadas a estrutura do SGHP (*Single Ground Holding Program*). Foi provado que o SGHP é de fluxo de rede dual, mas falha em um problema de fluxo primário. A matriz associada ao programa inteiro é totalmente unimodular, isto implica que o programa inteiro associado pode ser resolvido usando técnicas de programação linear.

Uma consequência adicional é que SGHP pode ser resolvido em tempo polinomial no tamanho da entrada, desde que o programa linear correspondente possa ser resolvido em tempo polinomial.

3.2 Abordagem usando Sistemas Especialistas

3.2.1 Sistema Especialista para gerenciamento de tráfego aéreo

Do título original *Knowledge-based system for air traffic flow management - timetable rescheduling and centralized flow control* este trabalho apresenta um sistema especialista com uma base de conhecimento projetada para o problema de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM). Trata-se de uma tese de doutorado defendida no Instituto Tecnológico da Aeronáutica em 1994 [Weigang 1994]. O sistema foi projetado para fazer modificações nas tabelas de horários de vôos, reescalando essas tabelas e reduzindo a sobrecarga em aeroportos durante horários de pico. O protótipo, centralizado, funcionava ininterruptamente prevendo o local, o horário e a magnitude do congestionamento. Possuía uma base de conhecimento programada com recursos do paradigma de programação lógico. Seus testes incluíram os principais aeroportos brasileiros. Um dos problemas apresentados foi relativo à arquitetura centralizada do modelo que recebia os dados referentes a alterações ocorridas, processando-as na ordem de chegada. Isto gerou problemas de desempenho devido à sobrecarga do ponto central de processamento, onde se localizava a base de dados e regras do sistema especialistas. Outro fato que influenciou o mau desempenho do sistema, na época, foi o uso de uma linguagem interpretada [Lin e de Souza Mota 2007].

3.3 Abordagens em Teoria dos Grafos

3.3.1 Modelo dinâmico de fluxo de redes para ATFM

Com o título original *Dynamic Network Flow Model for Short-Term Air Traffic Flow Management* este artigo apresenta uma visão bastante interessante da representação de fluxos via Teoria dos Grafos associada ao uso de programação inteira. O artigo tenta resolver o problema de gerenciamento de fluxo em tráfego aéreo e sugere que o mesmo modelo pode ser usado para aplicação em soluções de espera em solo [Ma et al. 2004].

O modelo define um grafo $G = (N, E)$ onde N é o conjunto de vértices e E é o conjunto de pares de vértices ligados por arcos (arestas) direcionados. De maneira geral, um fluxo em um grafo é um caminho por onde se transfere alguma coisa de um vértice para outro viajando através dos arcos nas direções indicadas. Supondo que i e j são vértices, o artigo define (i, j) como sendo o arco de i para j e (j, i) o arco direcionado de j para i . Cada arco ou aresta (i, j) tem a ele associado uma capacidade c_{ij} e um custo de envio através do arco denominado a_{ij} que representa o número de períodos de tempo necessários para que uma unidade de fluxo viaje pelo arco (i, j) , ou seja, é o tempo de travessia de (i, j) . O número máximo de unidade de fluxo que pode entrar em (i, j) no período com início em t é $c_{ij}(t)$, para $t = 0, 1, 2, 3, \dots$

O autor define um modelo de fluxo dinâmico que obedece as capacidades em todos os períodos de tempo. Ainda considerando o modelo podemos depreender

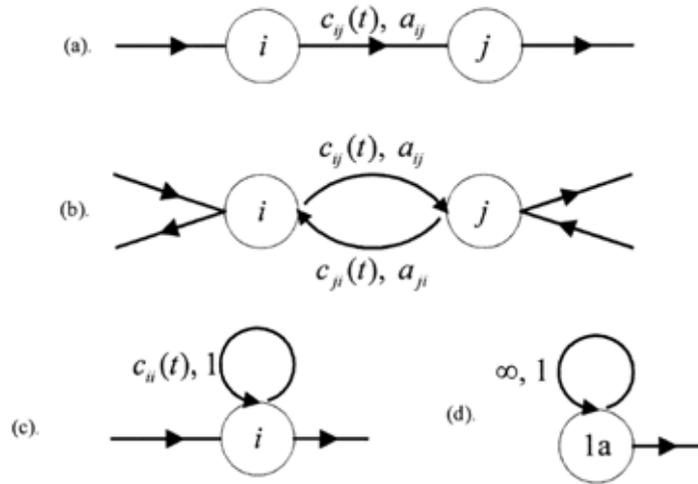


Figura 3.1: Exemplo da representação dos nodos no modelo: (a) e (b) modelagem das rotas aéreas. (c) espera no ar. (d) espera em solo

que os arcos são considerados rotas, que aeroportos e pontos de transferência de controle são as origens e os destinos no grafo, e que os vôos são unidades de fluxo viajando das origens para os destinos. Algumas considerações são admitidas e advêm das características específicas do problema:

1. As unidades de fluxo são sempre inteiras.
2. Uma unidade de fluxo sempre viaja de uma origem para um destino.
3. Os arcos são unidirecionais, no caso de aerovias que diferenciam sentidos de rotas pela altitude, considera-se dois arcos com sentidos opostos para a mesma aerovia.
4. O tempo de travessia é constante não importando a aeronave, isto é, todas as aeronaves levam o mesmo tempo para percorrerem um arco.
5. Existe uma previsão das capacidades dos arcos em um horizonte de 2-3 horas no futuro, ou seja, sabe-se $c_{ij}(t)$ com até três horas de antecedência.
6. O tempo é discretizado (t_0, t_1, \dots, t_n) e a capacidade em $c_{ij}(t_r)$, com $r = 0, 1, \dots, n$ é denotada pelo limite superior das unidade de fluxo no arco (i, j) entre os tempos t_r e t_{r+1} .
7. Respeita-se as capacidades máximas em cada setor.

O modelo considera uma análise conjunta do multifluxo e acrescenta um fluxo transversal que cruza a região sem, no entanto, pousar. Define uma série de pontos de transferência de controle que representam as transições entre setores. O uso de arcos bidirecionais tem a finalidade de simplificar a representação gráfica do modelo. Uma característica interessante desse modelo é a definição de pontos de

aproximação com espera no ar (*Airbone holding point* – AHP) representados por *loops* de capacidade limitada e tempo de travessia unitário ($c_{ii}(t)$ e $a_{ii} = 1$), além de pontos de espera em solo, denotadas por *loops* nos próprios aeroportos com capacidade infinita e tempo de travessia unitário ($c_{ii}(t) = \infty$ e $a_{ii} = 1$).

O plano de vôo é a rota principal do vôo. Rotas alternativas são os possíveis caminhos alternativos dentro do grafo com algumas restrições impostas pelo modelo que serão vistas a seguir. Os caminhos alternativos, que usam arcos “bobos”, são penalizados de forma que eles sejam considerados apenas em casos de extrema necessidade (Arcos “bobos” são definidos como arcos alternativos que não pertencem à rota real da aeronave).

O modelo ainda apresenta um conjunto de variáveis de fluxo de rede $f_{i,j}^k(t)$ que é a quantidade real de fluxo sobre o arco (i, j) do tempo t ao tempo $t + 1$ sobre o conjunto de planos k que compartilham o mesmo fluxo. A função objetivo inclui o custo do consumo de combustível, o custo de AHP e GHP, o custo de pousos em locais alternativos e a penalidade por viajar em arcos “bobos” [Ma et al. 2004]. As restrições são:

1. O balanceamento de fluxo nas origens: de forma geral a equação diz que para um tempo t só haverá balanceamento se o número de aeronaves que entra na rede é igual ao número de aeronaves que sai.
2. O balanceamento de fluxo em nós intermediários: de forma geral a equação diz que só haverá balanceamento interno se o fluxo que sai for igual ao fluxo que entra em um arco.
3. O balanceamento de fluxo em nós de destino: de forma geral a equação considera que dentro de uma janela de tempo todo fluxo gerado deverá ser consumido.
4. Uma rota tem uma capacidade limite associada à capacidade dos setores.
5. O fluxo só admite valores inteiros.

Define-se então uma função objetivo e um conjunto de restrições sobre os parâmetros dessa função como é feito tradicionalmente em programação linear.

3.3.2 ATFM sobre grafos com aplicação de Programação Dinâmica

Do título original *Short-Term Flow Management Based on Dynamic Flow Programming Network* este modelo apresenta um gerenciamento dinâmico de fluxo [Zhang et al. 2005]. É uma melhoria do modelo de Cheng Peng [Peng et al. 2001] visto na subseção 3.3.1 com uma aplicação prática. O autor afirma que o modelo de gerenciamento de fluxo de Cheng Peng tem um custo computacional elevado e demora muito para se obter a solução desejada. Ocorrem ajustes no fluxo que minimizam as perdas, ou seja, garante um custo mínimo esperado [Peng et al. 2001]. A rede é modelada por um grafo direcional $G(I, A)$ onde I é o conjunto de vértices e A é conjunto de arestas. Os setores (incluindo setores terminais) são mapeados por vértices e o fluxo é feito ao longo das arestas. O fluxo está sujeito aos

limites da capacidade das áreas terminais e setores de transferência. Os setores intermediários são pontos de transferência. Os *Navoids* são as conexões entre segmentos de rota e conectam vértices que não são origem e nem destino.

O caminho do voo ou plano de voo é uma seqüência de arcos na rede do grafo. O modelo considera a possibilidade de várias seqüências (rotas alternativas para o mesmo voo). Todos os caminhos possíveis para um conjunto de aeronaves definem uma categoria de fluxo.

Para que o modelo seja válido são admitidas algumas hipóteses:

1. Um fluxo de tráfego tem no mínimo um voo.
2. As arestas são direcionais ou bidirecionais.
3. O tempo de transmissão de cada aresta é constante (não considera a velocidade da aeronave). O tempo de transmissão de loops é uma unidade de tempo.
4. A capacidade do arco (i, j) é $C_{i,j}(t), t \in [0; T]$ e T é o tamanho do tempo de gerenciamento.
5. Cada área de controle é dividida em subáreas (setores ATC) e o fluxo total tem um limite superior que é a carga máxima do setor.

Para representar o fluxo de aeronaves que entra e que sai da área de controle define-se nós fonte (*source nodes*) e nós destino (*sink nodes*). As hipóteses acima são premissas do modelo de Cheng Peng [Peng et al. 2001] para o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo. O autor, então, sugere melhoramentos específicos no procedimento de solução através de programação dinâmica.

Define-se então uma função objetivo e um conjunto de restrições. Apresenta-se, então, um método de simplificação que elimina alguns dos parâmetros e define outros que são usados para chegar em uma solução com um tempo menor que o procedimento exaustivo.

Este modelo tem forte aplicabilidade na realidade brasileira. O Brasil apresenta apenas um Centro de controle para cada Região de Informação de Voo, cada setor tem capacidades associadas e ao longo dos caminhos percorridos pelas aeronaves ocorre uma seqüência de ocupações de setores análoga ao percurso de um caminho dentro de um grafo. Além disso, os centros de controle trabalham restringindo o fluxo através da medida restritiva que limita a taxa de entrada a partir dos terminais, de forma similar o fluxo em grafos pode ser restringido pelo taxa de entrada no nodo fonte. De fato, o modelo a ser aplicado na modelagem do Módulo de Balanceamento de fluxo tem forte influência das idéias de Zhang [Zhang et al. 2005].

3.4 Abordagens em técnicas Multi-agente

3.4.1 Sistema Multi-agentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo

Este estudo tem por objetivo resolver o problema do ajuste entre os horários de decolagem e pouso em diferentes aeroportos usando para isso técnicas de negociação entre agentes. O modelo proposto por Marcos Dib [Dib 2004] é um projeto de um sistema que atua no auxílio do gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, mais especificamente no planejamento pré-tático. Este sistema foi denominado Sistema Multi-agentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFSM-MAS). Uma descrição precisa do funcionamento dos serviços de tráfego aéreo e informações relacionadas podem ser obtidas em [Dib 2004]. O modelo apresenta uma fusão de tecnologias, a saber: tecnologias de multi-agentes (Inteligência Artificial Distribuída - IAD), tecnologia *Web Service*, Tecnologia de *Grid* Computacional e de serviços. Dentro da tecnologia de multi-agentes o autor usa agentes reativos não baseados em utilidade geridos por um parâmetro de balanceamento padrão. Existem basicamente três tipos de agentes: Agentes ATC (*Air Traffic Control*), Agentes Pré-ATC e Agentes de Planejamento Tático (Agentes PT), os quais atuam em conjunto em um aeroporto. Para negociar o fluxo para um aeroporto, o modelo usa uma medida de fluxo e uma medida do congestionamento na utilização dos recursos. Essa quantidade denominada Padrão de Balanceamento de Aeroporto (PBA) é uma função do tempo de atraso de cada vôo e do peso (fator de importância) associado a ele.

O PBA é função do tempo de atraso. 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, combinando-se o tempo de atraso com o fator de importância (peso) do vôo atrasado tem-se a indicação da carga do aeroporto [Dib 2004].

Calcula-se PBA distintos para as aterrissagens e decolagens das aeronaves. Em virtude da intenção de minimizar a retenção de aeronaves no ar, a função de peso do atraso foi simplificada para a multiplicação de cada minuto de atraso por um peso. O modelo propõe uma relação de pesos com o intuito de que o sistema possa produzir uma avaliação compatível com a observação de um especialista.

Os agentes de planejamento tático possuem um comportamento individualista, isto é, visam a resolução de seus conflitos, repassando os problemas para os demais aeroportos que participam do *Grid*. Comportamento que inviabiliza qualquer negociação entre aeroportos, pois não haveria concessões. O modelo propõe o PBA como mecanismo de negociação. O PBA traduz em uma mesma medida a situação de cada aeroporto, gerando um padrão de balanceamento. Para o aeroporto o PBA é calculado localmente dentro de um período de tempo e indica a carga de movimentação ou congestionamento. Quanto maior o PBA, maior o congestionamento.

Baseado na sua capacidade de movimentação, cada aeroporto possuirá um indicador da quantidade de carga que pode ser absorvida, o PBA aceitável local. PBAs cujos valores excederem o PBA aceitável local provoca o processo de

negociação. É definido um PBA aceitável (padrão) que unifica a interpretação do ATFSM-MAS, quanto ao acionamento do processo de negociação. O valor do PBA aceitável padrão foi definido como sendo igual a 1. PBAs maiores ou iguais ao PBA aceitável disparam os agentes que acionam o *Grid*, quando inferiores a 1 indicam que os conflitos podem ser absorvidos localmente não sendo acionado o *Grid*.

O PBA padrão é um parâmetro que indicará a carga de processamento no *Grid*, isto é, o fluxo de mensagens de negociação entre os aeroportos. Quanto menor for o PBA padrão, maior será a carga de mensagens em tramitação. Por exemplo, um PBA aceitável igual a zero, significa que todos os conflitos, por menor que sejam, serão negociados até que toda a rede de aeroportos convirja para uma situação de inexistência de conflitos. Quando ATFSM-MAS é executado no *Grid Computacional*, os agentes PT monitoram a situação do fluxo de tráfego em seu aeroporto com o objetivo de prever o que acontecerá nas próximas duas horas do instante analisado. Quando possíveis conflitos são detectados o agente PT negociará com os aeroportos de origem dos vôos conflitantes para que essas aeronaves não decolem nos horários programados e ajustem seus horários para os propostos pelo agente de planejamento tático que iniciou a negociação.

O PBA de cada aeroporto funciona como um termômetro que mede a necessidade de mudanças nos horários que atinjam outros aeroportos.

O modelo multi-agentes apresentado na dissertação de Marcos V. P. Dib [Dib 2004] é um sistema para sincronização e gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo que combina tecnologias de Inteligência Artificial, coordenação de Multi-Agentes e computação distribuída sobre a *Internet* com uso de um *Grid* Computacional e tem a finalidade de otimizar o fluxo de tráfego aéreo, prevenindo congestionamentos e racionalizando a utilização dos recursos dos aeroportos sem ferir os princípios de segurança estabelecidos para a área de transportes aéreos [Dib 2004].

O Sistema Multi-Agentes para Sincronização e Gerenciamento de Tráfego Aéreo ou ATFSM-MAS se baseia em um grupo de agentes independentes que são criados na estação de trabalho (aeroporto). Cada aeroporto tem um conjunto de agentes que interagem entre si e com agentes externos, Figura 3.2.

Os Agentes ATC (*Air Traffic Control*) manipulam informações em tempo real, oriundas e destinadas aos controladores das torres de controle, controle de aproximação e centro de controle de área. Estes agentes são as interfaces com o mundo real, por meio deles os controladores de tráfego recebem as informações a serem repassadas para as companhias aéreas e pilotos. Têm como módulo principal o Monitor ATC que é responsável por implementar a interface de comunicação com os controladores. Recebem informações dos vôos que tiveram seus horários modificados por motivos diversos: clima, incidentes, fechamento de aeroportos, entre outras. Ele envia para o ATC informações dos vôos cujos horários foram modificados devido aos ajustes realizados pelo agente PT. Os Agentes Pré-ATC gerenciam o fluxo do aeroporto local (entrada/saída). Mantêm a escala de horários previstos para todos os vôos que saem e que chegam ao aeroporto. Maximizam a utilização das pistas e possibilitam a identificação de congestionamentos nas mesmas. Têm como módulos principais o *Scheduler* que ajusta vôos em conflito. Os Agentes de Planejamento Tático (Agentes PT) gerenciam o fluxo sobre todo o espaço aéreo,

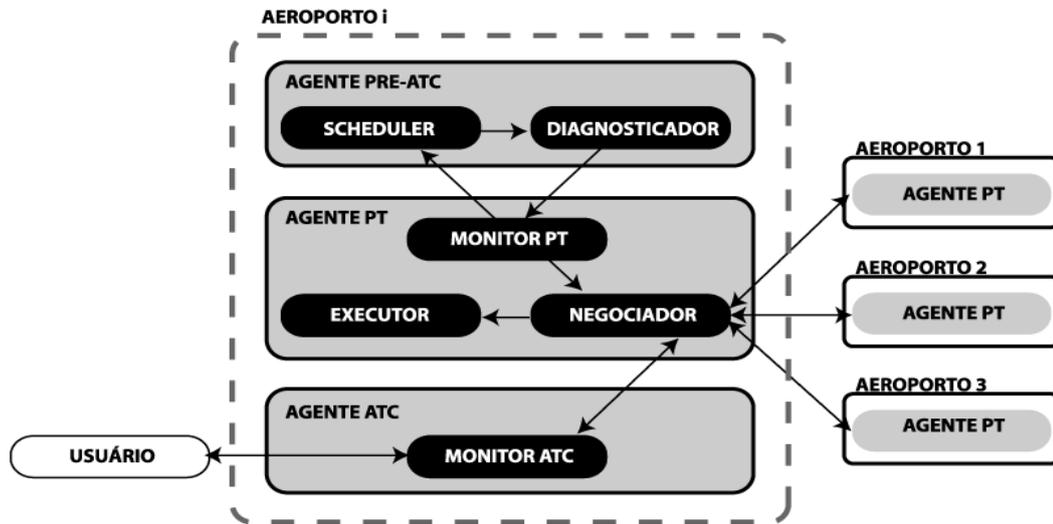


Figura 3.2: Agentes ATC (*Air Traffic Control*). Fonte: [Dib 2004]

com uma duração mais longa de rastreamento. Monitoram os agentes Pré-ATC, as negociações entre os agentes, o fluxo de tráfego aéreo esperado e geram novas escalas de horários, resultantes das negociações efetivadas e ainda propagam essas escalas para os demais agentes envolvidos.

A idéia básica é dotar cada aeroporto de um conjunto de agentes de software capazes de identificar os vôos em conflito, causadores de congestionamentos, e negociar com os aeroportos de origem desses vôos, mudanças de horários de decolagem de modo a evitar congestionamentos. Cada aeroporto local, participante do Grid de serviços, terá um agente autônomo para monitorar a situação do fluxo das aeronaves previstas para pousar e decolar em um futuro próximo. Adotou-se um tempo de duas horas. Caso o agente detecte uma possibilidade de congestionamento local, acionará outro agente, via Grid computacional, para a resolução do conflito e negociação de uma solução. Essa solução poderá resultar em três tipos de ação:

- Vôos já em rota no momento da análise: a solução será a retenção no ar.
- Vôos que ainda não decolaram: a solução será o atraso em solo no aeroporto de origem.
- Vôos programados para decolarem do aeroporto local: retardamento de sua decolagem.

O agente do aeroporto local 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. Orientará a necessidade de ajustar suas velocidades para atender aos novos horários de pouso estabelecidos na negociação para os vôos em rota, informará o novo horário de decolagem para as decolagens previstas do aeroporto local e entrará em contato com os agentes autônomos dos aeroportos de origem dos vôos geradores de conflitos.

Cada aeroporto tem o mesmo conjunto de agentes, sendo assim, no mesmo instante em que o aeroporto local estiver fazendo sua verificação de conflitos e contatando com os demais aeroportos, estes também estarão fazendo suas próprias análises e contatando os demais aeroportos do *Grid* de serviços.

O sistema ATFSM-MAS propõe suporte ao compartilhamento e uso coordenados de recursos diversos dos sistemas brasileiros de controle de fluxo de tráfego aéreo [Dib 2004]. Respeitando as diferenças na política de controle de cada região. O sistema ATFSM-MAS implementa, via *web services*, agentes de software executados sobre um *Grid* Computacional, possibilitando o sincronismo de ações entre os aeroportos envolvidos na solução. Trata-se de um *framework* JAVA utilizando-se das funcionalidades de *Grid* Computacional definidas pelo *Open Grid Services Infrastructure* - OGSi [Dib 2004]. O uso da ferramenta Globus Toolkit que implementa o *Grid* aplicando o conceito de *Grid* de Serviços, considerado como a próxima geração das aplicações baseadas nessa tecnologia.

3.4.2 Um Framework para Resolução de conflitos em ATFM

Com o título original *A Framework For Conflict Resolution In Air Traffic Management* este estudo propõe uma solução para o gerenciamento de tráfego aéreo através da atribuição, aos agentes, a responsabilidade de resolver seus conflitos. É um modelo baseado em agentes que controla o escalonamento e o espaçamento de vôos no espaço aéreo com aumento ou diminuição do tráfego. Incorpora algoritmos para resolução de conflitos aplicados a multi-agentes que garantem um pouso seguro através de trajetórias também seguras. Inclui também um mecanismo dinâmico de priorização que cuida da utilização eficiente dos recursos disponíveis, incluindo pistas de pouso e decolagem [Heymann et al. 2003].

Neste modelo, as aeronaves são vistas como agentes e o espaço aéreo é particionado em células. Cada aeronave pode ocupar apenas uma célula, o que garante a distância de segurança exigida. Cada célula, no modelo, é considerada um recurso do sistema. Os recursos do sistema são modelados como um grafo não direcionado, onde os vértices correspondem a células e as arestas representam as relações de adjacência entre duas células. Um agente (aeronave) viaja de um vértice origem a outro vértice destino. Uma trajetória percorrida por um agente é um caminho direcionado e rotulado pelo tempo de percurso da célula — cada aresta no caminho é rotulada pelo tempo de percurso no vértice precedente — o número de agentes no sistema não é fixo e geralmente muda com o tempo. Um agente pode entrar no sistema a qualquer instante e sair dele quando chegar ao destino.

De forma geral, cada agente define um conjunto de caminhos ótimos, esse conjunto é chamado de “plano legal” e os caminhos nesse plano legal são ditos não-conflitantes. O agente se movimenta necessariamente em um subconjunto do plano legal. Cada agente é direcionado a seguir um caminho arbitrário no plano legal. O coração do modelo é o mecanismo pelo qual o agente seleciona seu plano legal. A metodologia proposta consiste de duas fases algorítmicas precedidas por uma fase de iniciação:

1. Fase de iniciação: Cada agente que entra no sistema determina que cami-

nhos ótimos, dentro do plano legal, são não-conflitantes com os agentes já ativos no sistema (outras aeronaves).

2. Fase de resolução de conflitos: O agente resolve conflitos potenciais com os caminhos de todos os outros agentes entrantes. O algoritmo de resolução de conflitos encontra a solução mais abrangente, isto é, a que permite a acomodação de todos os agentes sem que outros conflitos sejam criados.
3. Fase de acomodação: Os agentes que no final da fase de resolução de conflitos obtiverem planos legais vazios, isto é, sem solução possível na configuração atual do sistema, acionam o algoritmo de acomodação para obter recursos a partir de negociação com os agentes ativos no sistema.

Os problemas referentes aos conflitos são resolvidos como um jogo não cooperativo (Teoria dos Jogos), com agentes gananciosos que competem por recursos conflitantes. É assumido que os recursos em disputa são priorizados sobre aqueles agentes que competem por ele. O algoritmo de resolução de conflitos produz um Nash-equilibrium, isto é, um conjunto de estratégias de agentes que sempre chegam a uma solução mais abrangente possível.

O modelo não aprofunda o problema da concentração de fluxo em determinados vértices, como os pontos de pouso, e salienta que os aeroportos têm que ter características definidas que permitam o seqüenciamento, escalonamento e espaçamento das aeronaves nos recursos do aeroporto. O uso do algoritmo de resolução de conflitos não prevê uma utilização ótima dos recursos aeroportuários o que inclui as pistas. O autor propõe um mecanismo dinâmico de priorização de recursos onde os atrasos são minimizados. O mecanismo é baseado em heurísticas e em um teorema básico que afirma, em termos gerais, a existência de pelo menos um caminho no plano legal do agente, desde que haja uma priorização de recursos para esse agente [Heymann et al. 2003]. Tal mecanismo deve ter as seguintes propriedades:

1. Se um recurso de pouso é priorizado para um dado agente, então todos os recursos de pelo menos um caminho a esse recurso é priorizado para esse agente, sempre que possível.
2. Cada recurso de pouso ao longo de exatamente um caminho priorizado completo é removido da priorização dinâmica e da resolução do sistema se tal caminho ao recurso de pouso existir.
3. Aeronaves em atraso têm maior prioridade de pouso. Tal prioridade recebe incrementos monótonos à medida que o atraso avança.

A primeira propriedade assegura o agente que tem prioridade de pouso num horário específico terá um caminho a ele alocado, não-conflitante, para realizar o pouso. A segunda propriedade é mantida para a implementação de leis de controle recursivo e para minimizar os atrasos nos pousos. A terceira propriedade assegura que agentes individuais sejam tratados de forma razoável mantendo reduzidos os atrasos de pouso.

Este modelo, apesar de inovador e ambicioso, ainda é bastante utópico e não é compatível com as regras operacionais atualmente utilizadas pela ICA 100-12 (Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo) [DECEA 2006].

3.5 Abordagem da proposta sugerida

Como visto, existem diversas técnicas já aplicadas com o objetivo de resolver problemas em ATFM. As soluções aplicam Pesquisa Operacional associadas a modelos matemáticos e estocásticos, variações em programação inteira, variações com Teoria dos grafos e aplicações distribuídas com o uso de técnicas multi-agentes. A proposta deste trabalho é baseada em Teoria dos grafos, inspirada nos trabalhos de Ma [Ma et al. 2004] e Zhang [Zhang et al. 2005] e nos algoritmos desenvolvidos nessa teoria para aplicação em computação [Cormen et al. 1998], além das idéias de Mukherjee [Liu et al. 2006] para a modelagem de cenários aéreos.

As soluções mostradas neste capítulo apresentam vantagens, que devem ser observadas e utilizadas em novos modelos, e desvantagens, que servir como base para melhoramentos futuros. A metodologia empregada será mostrada no Capítulo 4, a modelagem e a implementação serão descritas nos Capítulos 5 e 6 respectivamente.

Capítulo 4

Metodologia e Fundamentos

Este capítulo descreverá a nomenclatura empregada mais adiante e a metodologia relacionada. A Teoria dos grafos é uma teoria consolidada há vários anos e apresenta uma nomenclatura específica que carece de uma descrição sucinta para que o leitor possa estar familiarizado com os termos utilizados [Cormen et al. 1998].

4.1 Teoria dos Grafos

Definição 4.1.1 (Grafo). *Um grafo $G(V,E)$ é um conjunto finito não-vazio V de vértices e um conjunto E de pares de aresta não-ordenadas de elementos distintos de V . [Szwarcfiter 1984]*

Cada aresta $e \in E$ do grafo G é representada por um par de vértices (u, v) com $u \in V$ e $v \in V$. Denotaremos ainda $|V|$ e $|E|$ o número de vértices e arestas do grafo G , respectivamente.

Definição 4.1.2 (Grafo trivial). *Um grafo G é dito trivial se $|V| = 1$.*

Definição 4.1.3 (Grafo Esparso). *Um grafo G é dito esparso se $|E|$ é muito menor que $|V|^2$, ou seja $(|E| \ll |V|^2)$.*

Definição 4.1.4 (Grafo Denso). *Um grafo G é dito denso se $|E|$ é próximo de $|V|^2$, ou seja $(|E| \ll |V|^2)$.*

Definição 4.1.5 (Vértices adjacentes). *Dois vértice $u \in V$ e $v \in V$ são ditos adjacentes se existe uma aresta $e \in E$ tal que $e = (u, v)$.*

Definição 4.1.6 (Grau de um vértice). *O grau de um vértice $v \in V$ é o número de vértices adjacentes a v .*

Na figura 4.1 o grau do vértice x é igual a 4.

Definição 4.1.7 (Caminho). *Um caminho em um grafo é uma seqüência de vértices v_1, \dots, v_k tal que $(v_j, v_{j+1}) \in E$ e $1 \leq j < |k - 1|$.*

Na figura 4.1 a seqüência u, v, w, x, k é um caminho no grafo. Outro caminho possível é u, v, w, x, v, w, x, k .

Depreende-se da definição que um caminho de k vértices é formado por $k - 1$ arestas. O valor $k - 1$ é o comprimento do caminho.

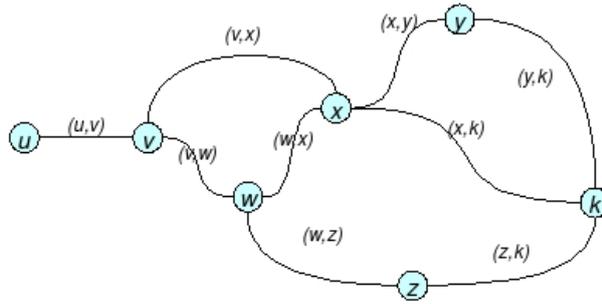


Figura 4.1: Adjacência: os vértices x e w são adjacentes pois existe a aresta (w, x)

Definição 4.1.8 (Trajeto). *Um trajeto é um caminho onde as arestas são distintas, não havendo repetição da mesma aresta no percurso do caminho.*

Na figura 4.1 a seqüência u, v, w, x, k é um trajeto no grafo, mas u, v, w, x, v, w, x, k não é um trajeto pois a aresta (v, w) é repetida nesse caminho.

Definição 4.1.9 (Grafo acíclico). *Um grafo é dito acíclico se todo caminho nesse grafo é um trajeto. Caso contrário ele é dito cíclico.*

Observe que na figura 4.1 um caminho que repete arestas forma um ciclo no grafo.

Definição 4.1.10 (Conexidade). *Um grafo $G(V, E)$ é denominado conexo quando existe um caminho entre cada par de vértices de G . Caso contrário G é desconexo.*

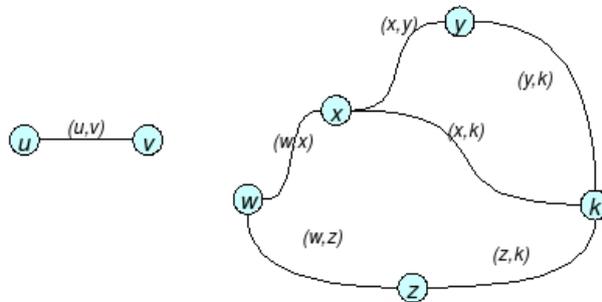


Figura 4.2: Conexidade: o grafo não é conexo pois não existe um caminho ligando os vértices u e k

Definição 4.1.11 (Distância entre vértices). *Denomina-se distância $d(v, w)$ entre dois vértices $v \in V$ e $w \in V$ de um grafo o comprimento do menor caminho entre v e w .*

Na figura 4.1 a distância $d(u, k) = 3$, pois temos o menor caminho u, v, x, k com 3 arestas.

Seja $G(V, E)$ um grafo, e $e \in E$ uma aresta. Denotamos por $G - e$ o grafo obtido de G pela exclusão da aresta e . Se v, w é um par de vértices não adjacentes

em G , a notação $G + (v, w)$ representa o grafo obtido adicionando-se a E a aresta (v, w) . Analogamente, se $v \in V$ é um vértice de G . O grafo $G - v$ denota aquele obtido de G pela remoção do vértice v e todas as arestas à ele adjacente.

Definição 4.1.12 (Grafo completo). *Um Grafo é completo quando existe uma aresta para cada par de vértices do grafo. É comum a utilização da notação K_n para designar um grafo completo de n vértices.*

Definição 4.1.13 (Subgrafos). *Um subgrafo $G_2(V_2, E_2)$ de um grafo $G_1(V_1, E_1)$ é um grafo tal que $V_2 \subseteq V_1$ e $E_2 \subseteq E_1$.*

Definição 4.1.14 (Corte de vértice). *Um corte de vértices de G é um subconjunto minimal de vértices $V' \subseteq V$ cuja remoção, juntamente com as arestas em que um dos componentes esteja em V' , de G o desconecta ou o transforma em um grafo trivial.*

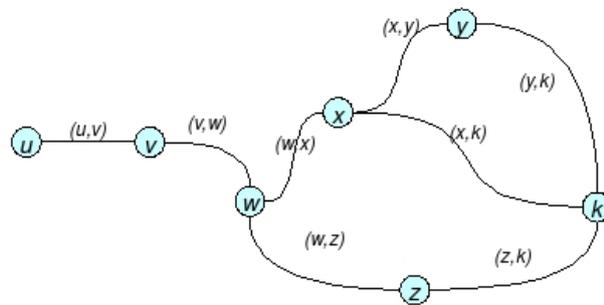


Figura 4.3: O subconjunto $\{w\} \subset V$ é um corte de vértice, pois retirando-se esse vértice temos um grafo desconexo.

Definição 4.1.15 (Corte de aresta). *Um corte de arestas de G é um subconjunto minimal de arestas $E' \subseteq E$ cuja remoção de G o desconecta.*

Na figura 4.1 o subconjunto $\{(v, x)e(v, w)\} \in E$ é um corte de aresta.

Definição 4.1.16 (Grafos Direcionados - Digrafo). *Um grafo $G(V, E)$ é dito direcionado ou digrafo se todas suas arestas $(v, w) \in E$ possuem um único sentido de v para w .*

Definição 4.1.17 (Partição de um Grafo). *Um grafo $G(V, E)$ é dito particionado quando obtem-se dois ou mais subconjuntos de V , a partir de cortes de aresta, tal que a intersecção desses subconjuntos, dois a dois, seja vazia.*

4.1.1 Fluxo em Grafos (Redes)

A Teoria dos grafos modela rodovias como grafos dirigidos para determinar, por exemplo, o menor caminho entre dois pontos. Em um fluxo de rede um determinado material viaja de uma fonte (origem), onde é produzido, a um sorvedouro

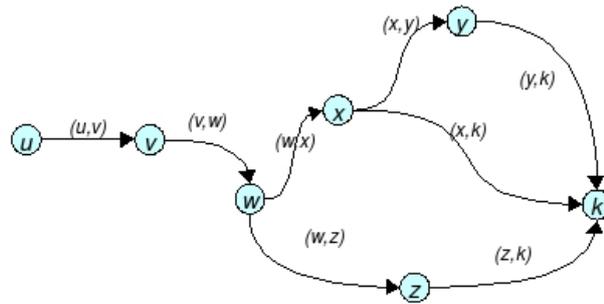


Figura 4.4: Grafo direcionado: observe que não existe nenhum caminho a partir do vértice k .

(destino), onde é consumido. O material que é produzido na fonte em uma determinada taxa, deve ser consumido pelo sorvedouro na mesma taxa para que não ocorram problemas de falta ou excesso de fluxo. O fluxo do material em qualquer ponto da rede é a taxa com que o material se move no conjunto da rede. Pode-se modelar a fluidez de um líquido em canos, energia elétrica fluindo em uma rede de fios, o tráfego de informações em uma rede de telecomunicações etc. A teoria associa a cada aresta dirigida um condutor de material e os vértices podem ser junções de condutores, a fonte ou o sorvedouro. Os vértices intermediários respeitam a conservação do fluxo, isto é, todo fluxo que entra em um vértice, sai dele na mesma taxa que entrou.

No problema do fluxo máximo, deseja-se computar a maior taxa de material que se pode transportar desde a origem até o destino, sem a violação dos limites de capacidade de cada condutor (aresta). Este problema é um dos mais simples em se tratando de teoria dos grafos e seus algoritmos podem ser adaptados para resolver outros problemas de fluxo em redes. Em particular, pode-se pensar no fluxo de aeronaves no espaço aéreo, como trataremos mais adiante.

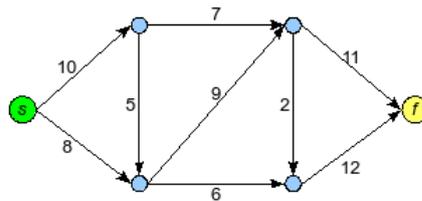


Figura 4.5: Apresenta uma fonte, um sorvedouro e quatro vértices intermediários.

Na literatura sobre grafos, as redes são modeladas como grafos direcionados [Szwarcfiter 1984, Netto 2001, Cormen et al. 1998], onde a capacidade das arestas são valoradas e procura-se determinar a taxa máxima de fluxo desde a origem, denominado fonte (*source*), a outro vértice denominado sorvedouro (*sink*). A figura 4.5 e a figura 4.6 mostram exemplos de grafos que representam fluxos em rede. O objetivo, então, é determinar a quantidade máxima que pode passar (fluir) pela rede obedecendo-se os limites de capacidade de cada aresta.

A notação utilizada pelos autores pode variar bastante, por isso este trabalho

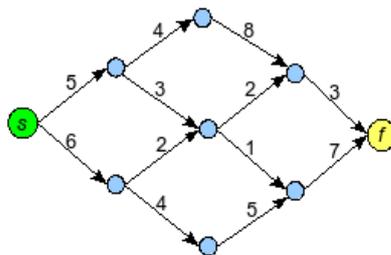


Figura 4.6: Uma fonte, um sorvedouro e sete vértices intermediários. Os números representam as capacidades de cada aresta.

será baseado no padrão de notação usado por Cormen [Cormen et al. 1998].

Um fluxo de rede $G = (V, E)$ é definido sobre um grafo dirigido em que cada aresta $(u, v) \in E$ tem uma capacidade não negativa $c(u, v) \geq 0$. Existem dois vértices especiais: a origem s (fonte) e o destino do fluxo t (sorvedouro). Tem-se então que para todo vértice intermediário v existe um caminho $s \rightsquigarrow v \rightsquigarrow t$. Dessa forma o grafo é conexo. O fluxo em G é a função real $f : V \times V \rightarrow \Re$ que satisfaz a três propriedades:

1. A limitação da capacidade da aresta $f(u, v) \leq c(u, v) \forall u, v \in V$;
2. A simetria reversa $f(u, v) = -f(v, u) \forall u, v \in V$;
3. A conservação de fluxo exige que $\sum_{v \in V} f(u, v) = 0$ para todo $u \in V - \{s, t\}$ e $v \in V - \{s, t\}$, ou seja, o fluxo que entra, em qualquer vértice, é igual ao fluxo que sai desse vértice, com exceção da origem e do destino.

O valor do fluxo $f(u, v)$ pode ser positivo, negativo ou nulo e denota-se por

$$|f| = \sum_{v \in V} f(s, v) \tag{4.1}$$

que é o fluxo total de saída da origem.

Uma rede de fluxo pode ter várias origens e destinos. Neste caso, converte-se o conjunto de fontes em uma única fonte e o conjunto de sorvedouros em um único sorvedouro adicionando-se, respectivamente, uma superfonte e um supersorvedouro ligados por arestas de capacidade infinita aos respectivos nós fontes e sorvedouros. Em termos de fluxo na rede as duas situações são equivalentes [Cormen et al. 1998].

Cormen, em [Cormen et al. 1998], define uma notação de somatório implícito que considera subconjuntos de vértices e todos os possíveis caminhos entre esses conjuntos. Com efeito, se X e Y são conjunto de vértices em V temos:

$$f(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} f(x, y). \tag{4.2}$$

Usando essa notação, mais simplificada, pode-se escrever a conservação de fluxo como $f(u, V) = 0$ para todo $u \in V - \{s, t\}$. Também é comum a omissão das chaves, então $V - \{s\}$ significa $V - s$.

Pode-se definir um lema bastante útil usando a notação implícita:

Lema 4.1.18 (Propriedades de redes de fluxo). *Seja $G = (V, E)$ um fluxo de rede, e f o fluxo em G . Então as seguintes relações são válidas:*

1. $f(X, X) = 0, \forall X \subseteq V$;
2. $f(X, Y) = -f(Y, X), \forall X, Y \subseteq V$;
3. $f(X \cup Y, Z) = f(X, Z) + f(Y, Z)$ e $f(Z, X \cup Y) = f(Z, X) + f(Z, Y)$
 $\forall X, Y, Z \subseteq V$ com $X \cap Y = \emptyset$

4.1.1.1 Algoritmos de Fluxo em Grafos

O método Ford-Fulkerson: O método de Ford-Fulkerson para resolver o problema do fluxo máximo é chamado de método, e não um algoritmo devido ao fato dele considerar diversos passos com tempos de execução diferentes. O método depende de três considerações chave, que são relevantes para muitos problemas associados ao fluxo: as redes residuais, os caminhos de incremento e os cortes. Esses conceitos são importantes para um importante teorema conhecido como *Teorema do Corte Mínimo/Fluxo Máximo* [Cormen et al. 1998]. O método é iterativo e inicia o processamento com o fluxo nulo $f(u, v) = 0$ para todo $u, v \in V$. A cada iteração o fluxo é aumentado encontrando-se um caminho de incremento. O caminho de incremento é um caminho da origem ao destino em que podemos aumentar o fluxo. O processo é repetido até que não haja mais caminhos de incremento na rede. O teorema do Corte Mínimo/Fluxo Máximo mostra adiante que este processo conduz ao fluxo máximo.

Uma rede residual consiste de arestas que admitem o aumento do fluxo. Sendo $G = (V, E)$ um fluxo com origem s e destino t , um fluxo f e $u, v \in V$, a quantidade de fluxo que pode-se acrescentar a f sem ultrapassar a capacidade limite $c(u, v)$, chamada capacidade residual é dada por $c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v)$. A rede residual de G induzida pelo fluxo f é $G_f = (V, E_f)$ onde $E_f = \{(u, v) \in V \times V : c_f(u, v) > 0\}$.

Um corte (S, T) em uma rede de fluxo G é uma partição de V em S e T de modo que $T = V - S$ e a origem s esteja em S ($s \in S$) e o destino t esteja em T ($t \in T$). O método de Ford-Fulkerson é fortemente apoiado no Teorema do Corte Mínimo/Fluxo Máximo que afirma o seguinte:

Teorema 4.1.19 (Teorema do Corte Mínimo/Fluxo Máximo). *Se f é um fluxo em uma rede de fluxo G com origem s e destino t , as seguintes condições são equivalentes:*

1. f é um fluxo máximo em G .
2. A rede residual G_f não contém caminhos de incremento.
3. $|f| = c(S, T)$ para algum corte (S, T) em G .

FORD-FULKERSON(G, s, t)	
1	Para cada aresta $(u, v) \in E(G)$ faça
2	$f(u, v) = 0$;
3	$f(v, u) = 0$;
4	Enquanto haja caminhos p de s a t na rede residual faça
5	$c_f(p) := \min_{(u, v) \in p} c_f(u, v)$
6	Para cada aresta (u, v) em p faça
7	$f(u, v) := f(u, v) + c_f(p)$
8	$f(v, u) := -f(u, v)$

Tabela 4.1: Algoritmo Básico de Ford-Fulkerson [Cormen et al. 1998]

A demonstração desse teorema pode ser encontrada em [Cormen et al. 1998]. O método básico, definido por Fulkerson, pode ser resumido no algoritmo da tabela 4.1.

O tempo de execução do algoritmo depende de como se determina o caminho de incremento p na linha 4. Com base nisso, a literatura propõe um algoritmo que realiza uma busca em largura na procura por esses caminhos e consegue um tempo polinomial na execução do algoritmo. Esse algoritmo é devido a Edmonds e Karp e usa o algoritmo para a obtenção do caminho mínimo proposto por Dijkstra.

O algoritmo de *Edmonds-Karp*: O Algoritmo de Edmonds-Karp é uma implementação do Algoritmo de Ford-Fulkerson para a resolução do problema de fluxo máximo em uma rede de fluxo. O primeiro distingue-se do segundo por procurar o menor caminho no grafo residual em cada interação, garantindo a finalização do processo em um tempo igual ou inferior ao algoritmo básico.

Na maioria das implementações, o menor caminho é encontrado usando busca em largura. Neste caso, o algoritmo roda em um tempo $O(VE^2)$. Este desempenho é assintoticamente mais lento que algoritmo *Relabel-to-front*, que roda em $O(V^3)$, mas é freqüentemente mais rápido para utilização em grafos esparsos.

O algoritmo foi publicado pela primeira vez pelo cientista russo Dinic, em 1970, e depois, de forma independente, por Edmonds e Karp que o publicaram em 1972. O algoritmo de Dinic incluiu técnicas adicionais pra reduzir o tempo para a ordem de $O(V^2E)$ [Dinic 1970].

Este algoritmo, com adaptações que permitiram sua utilização na estrutura de dados proposta, é descrito com maiores detalhes na Subseção 5.2.1. Seu pseudocódigo é mostrado na Tabela 4.2 e foi utilizado para a obtenção do fluxo máximo no grafo que representa as rotas válidas contidas na malha aérea estudada.

4.2 Metodologia

4.2.1 Multi-fluxo e a Priorização de fluxos

Um multi-fluxo é um fluxo onde as origens também são destinos e vice-versa. Pode-se pensar em um multi-fluxo, também, como a sobreposição de fluxos.

Algoritmo: EDMONDS-KARP(Grafo f)

- 1 Enquanto houver um caminho no grafo residual de f faça:
- 2 resíduo \leftarrow menor folga do caminho
- 2 Para cada setor no menor caminho faça:
- 3 fluxo no setor \leftarrow fluxo anterior + resíduo
- 4 fluxo residual no setor \leftarrow -fluxo no setor
- 5 Converta o fluxo computado para taxa de entrada.

Tabela 4.2: Algoritmo Básico de EDMONDS-KARP [Cormen et al. 1998]

O conjunto de caminhos (rotas) que interligam as terminais mostradas na Figura 4.7 compõe o multi-fluxo mostrado na Figura 4.8.

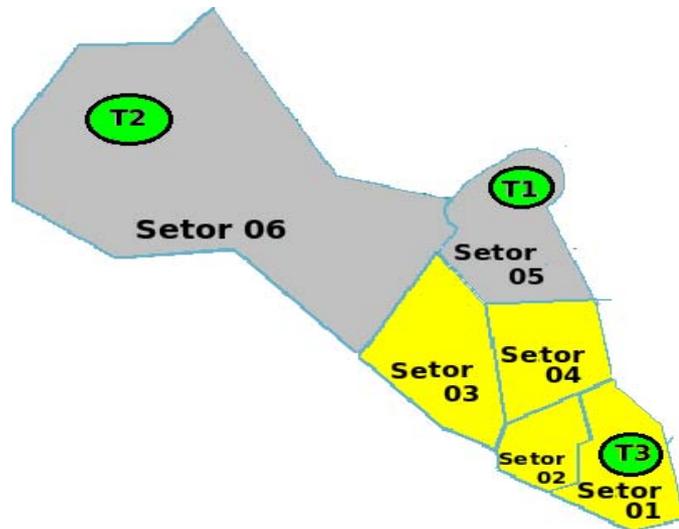


Figura 4.7: Recorte parcial da FIR-BS (adaptado do mapa gentilmente fornecido pelo CINDACTA I).

A Figura 4.8 mostra os fluxos com origens e destinos nas terminais T1, T2 e T3. veja, por exemplo, que estando no setor S04 pode-se ir para S01, S02, S03 ou S05. A composição desses fluxos corresponde ao multi-fluxo dentro.

As rotas que ligam os terminais T1, T2 e T3 são:

$$\text{Rotas : } \left\{ \begin{array}{l} T1 \ S05 \ S06 \ T2 \\ T1 \ S05 \ S04 \ S01 \ T3 \\ T2 \ S06 \ S05 \ T1 \\ T2 \ S06 \ S03 \ S02 \ S01 \ T3 \\ T3 \ S01 \ S04 \ S05 \ T1 \\ T3 \ S01 \ S02 \ S03 \ S06 \ T2 \end{array} \right.$$

De maneira simplificada pode-se identificar três fluxos na Figura 4.7: de T1 a T2 e T3; de T2 a T1 e T3; e de T3 a T2 e T1. Supondo que F é o número de fluxos deriváveis do multi-fluxo 4.8, no exemplo $F = 3$. É possível construir,

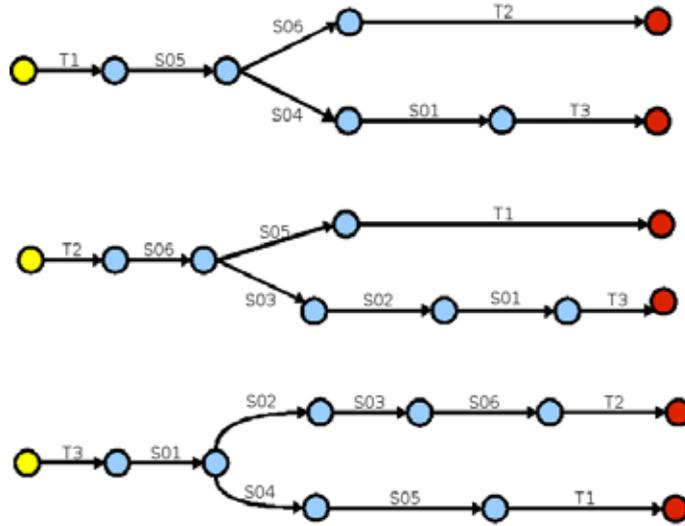


Figura 4.8: Multi-fluxo relacionado a parte da FIR-BS.

desses grafos, um grafo equivalente [Cormen et al. 1998] que combina todos esses fluxos, associando um nó fonte e um nó sorvedouro (veja Figura 4.9).

Priorização de fluxo, neste caso, significa distribuir as capacidades de forma que um determinado fluxo receba maior capacidade de fluência em relação a outro. Todos os setores são compartilhados entre os três fluxos (Figura 4.9). Desejando-se priorizar o fluxo a partir do terminal T2 é necessário aumentar a parcela da capacidade desse setor para o fluxo pretendido.

São, basicamente, duas as formas de se obter distribuições adequadas:

1. Os supervisores e/ou controladores podem definir cotas de fluxo com o auxílio de dados estatísticos de distribuições bem sucedidas, anteriormente adotadas. Isto permite o aproveitamento da experiência dos controladores.
2. O sistema pode aprender que quotas são as mais recomendadas para determinadas situações (uso de aprendizagem por reforço - AR). O recurso de Aprendizagem por reforço é prevista no Módulo de Apoio à decisão (MAAD) integrante do SISCONFLUX.

De fato, a combinação das duas técnicas é o mais indicado, de forma que haja uma evolução gradual nas decisões do sistema.

4.2.2 Análise de ocupação

Neste modelo define-se um grafo $G = (V, E)$ a partir do conjunto de setores que compõe a FIR-BS. Neste grafo existe um multi-fluxo correspondente à sobreposição dos fluxos direcionais com origem e destinos associados aos terminais. Diferentemente do modelo de Zhang [Zhang et al. 2005] as arestas correspondem aos setores e um caminho no grafo a uma rota possível. Cada aresta tem uma capacidade associada e os vértices representam o ponto de transição entre setores. Para ilustrar a representação considere a Figura 4.7 que mostra um recorte parcial da FIR-BS com apenas três terminais.

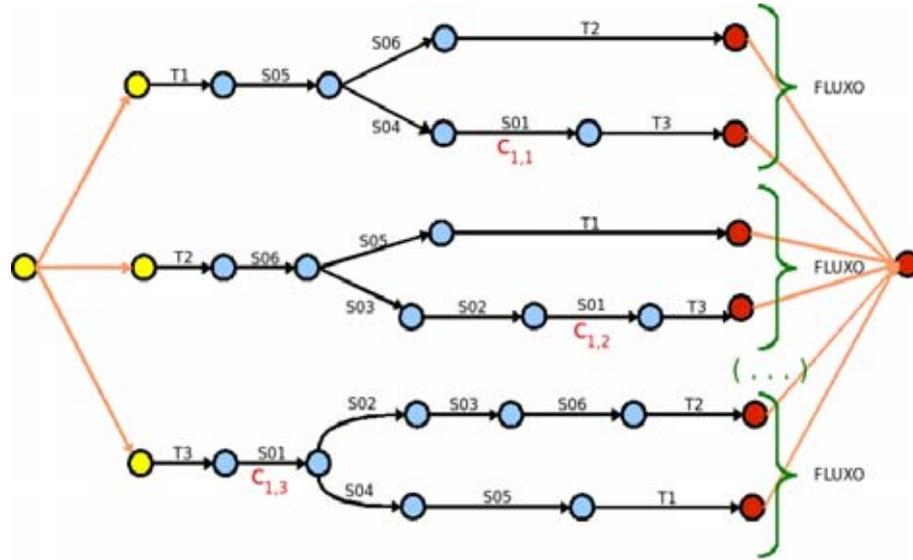


Figura 4.9: Acoplamento dos fluxos gerando o grafo completo

Considerando-se $C_{i,j}$ a capacidade do Setor i no Fluxo j , como a legislação limita a capacidade de cada setor a um valor constante M e supondo uma previsão de ocupação do setor i de U_i tem-se para o balanceamento uma folga de trabalho igual a $L_i = M - U_i$. Sob a seguinte condição,

$$\sum_{j=1}^f C_{i,j} \leq L_i \text{ para todo setor } i, \quad (4.3)$$

onde f é a quantidade de fluxos associados ao multi-fluxo.

Deseja-se que o aproveitamento do fluxo seja o maior possível, então pode-se procurar soluções em que

$$\sum_{j=1}^f C_{i,j} = L_i \quad (4.4)$$

Considerando-se $k_{i,j}$ a fração do fluxo j associada ao setor i pode-se reescrever a equação anterior como

$$\sum_{j=1}^f k_{i,j} L_i = L_i \text{ para todo setor } i \quad (4.5)$$

que resulta em

$$\sum_{j=1}^f k_{i,j} = 1 \text{ para todo setor } i \text{ e fluxo } j \quad (4.6)$$

sempre verdade pela própria definição de $k_{i,j}$. O problema, então, é o de determinar $k_{i,j}$ adequadamente de modo que o multi-fluxo tenha uma distribuição equilibrada (veja subseção 4.2.1).

O Balanceamento é realizado utilizando-se a previsão de ocupação obtida no Módulo de Avaliação e Previsão de Cenário (MAPC : é um módulo do SISCON-FLUX, veja seção 5.1. No contexto de Tráfego aéreo ocorre uma discretização do material que flui no grafo. Neste caso, por exemplo, pode ocorrer uma subutilização dos setores uma vez que existe um tempo de atraso entre a decolagem e a efetiva ocupação dos setores. Ao reduzir-se a taxa de decolagem para sanar o problema de saturação de um setor i que ficará saturado em sessenta minutos algum dos setores intermediários $i - 1, i - 2, \dots$, poderá trabalhar em uma taxa de ocupação muito baixa em relação ao que poderia (Dentro de uma rota temos o setor 1, setor 2, ..., setor i , setor $i + 1, \dots$). Isto se agrava quando este setor está na intersecção de vários caminhos (rotas que compartilham setores). Além disso, há a necessidade de ajuste de fluxo pós-decolagem, ou seja, a saturação irá ocorrer com as aeronaves que já decolaram. Neste caso as medidas de restrição de fluxo tornam-se críticas. Precisa-se controlar o fluxo interno na transição entre setores. Com essa finalidade o Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF) fará uma análise temporal setor a setor, dentro de uma determinada rota, procurando a possibilidade de aumento da capacidade residual do setor.

Se o *tempo médio* para transpor os setores fossem iguais a solução não precisaria considerar o tempo. Pensando dessa forma o fluxo seria aproximadamente contínuo e o modelo associado à previsão do cenário seria suficiente para os ajustes de espera em solo. Infelizmente, há variações nos tamanhos dos setores, variações nas velocidades das aeronaves e desvios que alteram o tempo de percurso dos setores. Uma solução que intencione considerar todas as variantes poderá recair em um tempo excessivo de processamento. Dessa forma, o balanceamento será projetado com base em estimativas. Considerando-se que:

1. Existe um tempo médio $m'_{s_i} \leq m_{s_i} \leq m''_{s_i}$ de percurso dos setores com um limite superior e inferior.
2. O tempo decorrido de cada aeronave no setor b_{v_j, s_i} é conhecido e acessível (v_j é o vôo j e s_i o setor i).
3. O *tempo de saída* ou o tempo que a aeronave levará para sair do setor a_{v_j, s_i} pode ser calculado com uma boa aproximação por $a_{v_j, s_i} = m_{s_i} - b_{v_j, s_i}$.
4. O tempo de entrada no setor i é igual ao tempo de saída do setor $i - 1$, estando os setores na mesma rota.

Toma-se a lista ordenada de vôos (aeronaves) na ordem crescente dos tempos de saída do setor $(s_i) = a_{v_j, s_i} \geq a_{v_{j-1}, s_i} \geq a_{v_{j-2}, s_i} \dots$. Realize a comparação do tempo de saída do primeiro elemento da lista (s_i) com o tempo de saída do primeiro elemento em (s_{i-1}). Se o tempo de saída de i for menor ou igual ao de saída de $i - 1$, a aeronave saíra antes que o anterior entre (ou ao mesmo tempo), logo a capacidade de i pode ser aumentada de uma unidade. Repetindo-se a mesma análise para as demais aeronaves da lista até que o tempo de saída de i torne-se maior que o tempo de saída de $i - 1$, neste caso a capacidade não muda visto que a aeronave permanecerá no setor no período de tempo considerado.

Em seguida devem-se processar os setores $i - 1$ e $i - 2$ para obter a capacidade estimada desses setores.

Através da análise das listas é possível obter o tempo necessário de espera em rota no caso de i estar saturado e o tempo de saída de $i - 1$ for muito pequeno. Neste caso pode ser sugerido uma espera em rota para uma das aeronaves da lista (s_{i-1}) acompanhada de uma estimativa de tempo de espera.

Após os ajustes de ocupação prevista em cada setor procede-se a execução do algoritmo de balanceamento e o conseqüente cálculo da taxa de decolagem dentro do terminal.

Dado que o fluxo determinado na origem seja f , o tempo médio de saída do terminal seja Δt_1 e o tempo de espera em solo seja Δt_2 , a taxa de entrada no fluxo T é calculada usando a expressão:

$$T = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{|f|} \quad (4.7)$$

Tem-se, dessa expressão, que com o aumento do fluxo permitido f ocorre uma diminuição do intervalo entre as decolagens, ou seja, decolarão mais aeronaves em um dado intervalo de tempo. O aumento do tempo de espera em solo Δt_2 determina um aumento do intervalo entre decolagens. A variável Δt_1 será tomada como uma média constante dentro de uma rota.

Capítulo 5

Modelagem

5.1 Visão geral

O Módulo de Avaliação e Balanceamento de Fluxo (MBF) 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). Receberá informações do Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD) acerca de modificações no cenário vigente não determinada pelos movimentos aéreos e ações que possam implicar alterações no fluxo de tráfego.

Uma vez projetado o cenário relativo ao fluxo de tráfego na FIR-BS, o Módulo de Avaliação e Balanceamento de Fluxo realizará a análise da distribuição dos movimentos aéreos em evolução, assim como as intenções de evolução (RPL e FPL), nos diversos setores controlados.

Ocorrendo a previsão de ocupação com valores próximos aos limites de congestionamento (80% da capacidade do setor) ou saturação (100% da capacidade do setor – Estes valores são definidos pelos Centros de Controle), associados ou não a fatores restritivos informados pelo MAAD, o MBF iniciará o processo de balanceamento do fluxo de tráfego através da análise do modelo simplificado que representará a distribuição das aeronaves na região de responsabilidade do CINDACTA I. Este balanceamento será obtido mediante a aplicação de processos balanceamento do fluxo de aeronaves dentro dos setores integrantes a FIR-BS, bem como das aeronaves oriundas dos outros FIRs, considerando-se as possibilidades de aplicação das medidas restritivas de fluxo de tráfego.

O MBF computa medidas restritivas que surtirão efeito na obtenção de um equilíbrio de fluxo com ênfase na manutenção das aeronaves em solo até que a possibilidade de congestionamento não esteja mais presente nas previsões do cenário. O MBF buscará a manutenção da maior fluidez possível, observando-se as restrições de capacidade dos setores de controle e o ajuste dessas capacidades de forma que a fluidez a partir de algum ponto na região possa ser priorizada. A escolha do parâmetro congestionamento ou saturação será determinada pelos supervisores levando-se em consideração fatores técnicos e operacionais vigentes no momento da aplicação de medidas restritivas de fluxo de tráfego – Estes parâmetros dizem respeito ao número máximo de aeronaves em cada se-

tor, no número de setores a serem analisados, dentre outros. Uma vez que as deliberações estejam definidas, o módulo direcionará as sugestões de ajustes de balanceamento ao Módulo de Avaliação e Apoio à Decisão (MAAD). O MAAD tem a incumbência de avaliar as sugestões, informar a equipe operacional acerca das ações recomendadas e efetuar o procedimento de aprendizagem que permitirá ao sistema armazenar um conjunto de decisões ideais e permitirá também uma adaptação do sistema ao meio.

Após a tomada de decisão e a submissão ao MAAD, este registra a previsão de cenário associada ao conjunto de ações que foram tomadas. As ações são aplicadas ao cenário real e o MAPC projeta um novo cenário, tomando por base as novas informações. Este novo cenário é, novamente, a entrada do módulo de balanceamento de fluxo (MBF) que reprocessa a necessidade de medidas restritivas, caso elas sejam necessárias.

Observa-se na Figura 5.1 a existência de um relacionamento entre os módulos que compõem o SISCONFLUX.

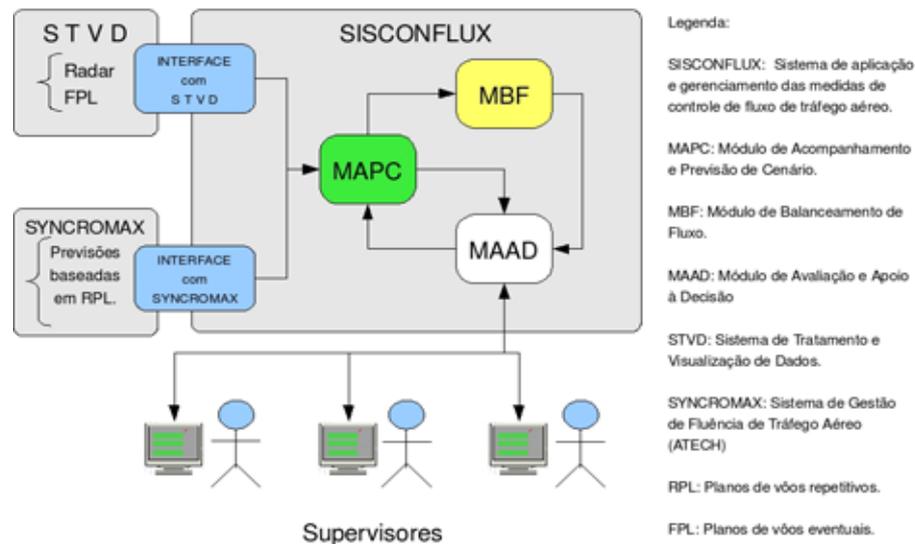


Figura 5.1: Esquema de módulos do SISCONFLUX.

Os módulos denominados *Interface com STVD* e *Interface com SYNCROMAX* disponibilizam os dados necessários ao processamento. A *Interface com o SYNCROMAX* dá acesso aos planos de vôos repetitivos, às previsões de fluxo projetadas com base nestes planos, além de outras informações administrativas e operacionais. A *Interface com STVD* provê os dados de tempo real como a atual posição das aeronaves, a velocidade atual, o posicionamento relativo ao mapa de setores, o tempo de vôo entre outros. Com base nessas informações, o MAPC processa um possível cenário produzindo um conjunto de informações que serão acessadas tanto pelo módulo de balanceamento, o MBF, como pelo módulo de avaliação, o MAAD.

O MAPC produzirá uma projeção de cenário em intervalos fixos de tempo ou quando for solicitado um novo processamento. Uma vez que o cenário esteja

processado, o MBF gera o conjunto de grafos que representarão em memória a previsão de cenário e os balanceará segundo as técnicas descritas nos Capítulo 6 e Seção 4.2.

Este trabalho refere-se à implementação do Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF), cuja arquitetura será apresentada a seguir.

5.2 Arquitetura do MBF

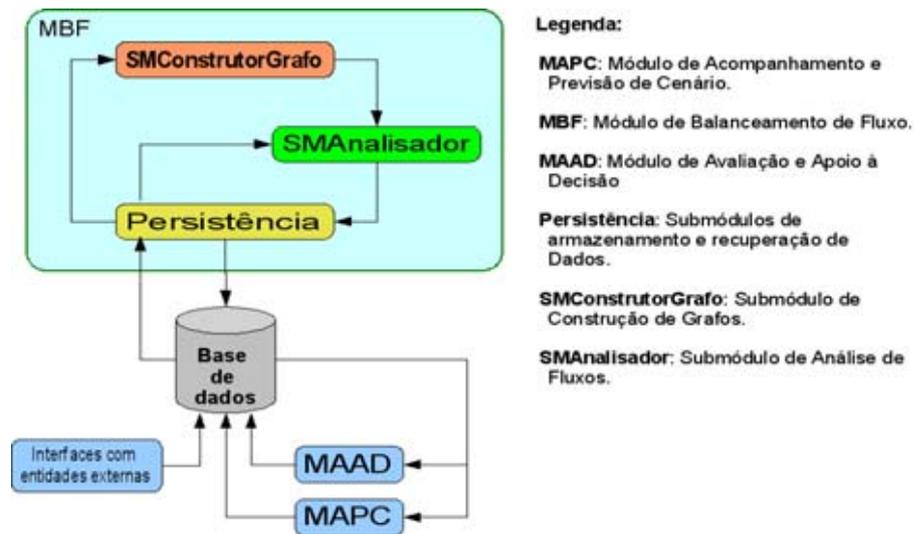


Figura 5.2: Arquitetura do Módulo de Balanceamento de Fluxo

O Módulo de Balanceamento de Fluxo de Tráfego subdivide-se em submódulos conforme mostra a Figura 5.2. O desenvolvimento inclui dois submódulos principais e o módulo de persistência de dados. 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. Mais adiante será apresentada uma descrição detalhada de cada submódulo. A solução proposta baseia-se na aplicação de teoria dos grafos em uma representação abstrata do multi-fluxo de vôos dentro da FIR-BS. O objetivo é, a partir da previsão de cenário e da distribuição da capacidade de cada setor, sugerir medidas restritivas de fluxo que possibilitem a utilização mais adequada das capacidades setoriais disponíveis. Pode-se listar os seguintes critérios relevantes à implementação do 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 subutilização 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, observada as orientações de melhores distribuições.
6. As medidas de fluxo máximo e/ou recomendáveis 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 para análise e submissão aos supervisores que apreciarão as sugestões, podendo aceita-las e aplicá-las ou solicitar um novo processamento.

5.2.1 Descrição dos submódulos

A seguir será apresentada uma descrição sucinta da funcionalidade de cada submódulo integrante ao MBF. Ressalta-se que a subdivisão do MBF em submódulos tem a intenção de distribuir tarefas inerentes ao conjunto, propiciando uma melhor organização estrutural, facilitando a compreensão global. De fato, foi utilizado uma abordagem *top down*, onde, a partir da atividade fim, define-se especializações especificamente projetadas para realização dessa atividade.

SMConstrutorGrafo (Submódulo de Construção de Grafos): Este submódulo tem a função de Construir o Grafo 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:

$$\text{Rotas : } \begin{cases} \text{T1 S05 S06 T2} \\ \text{T1 S05 S04 S01 T3} \end{cases}$$

$$\text{Rotas numeradas : } \begin{cases} \text{T1.(1) S05.(2) S06.(3) T2.(4)} \\ \text{T1.(1) S05.(2) S04.(5) S01.(6) T3.(7)} \end{cases}$$

Cada número é considerado um nó (vértice) e os setores são associados às arestas que interligam os nós.

5. Inclua o nó inicial rotulado por zero.

$$\text{Inclusão do nodo inicial : } \begin{cases} (0).\text{T1.(1) S05.(2) S06.(3) T2.(4)} \\ (0).\text{T1.(1) S05.(2) S04.(5) S01.(6) T3.(7)} \end{cases}$$

6. Monte uma matriz de setores rotulando cada setor com o nome do setor e ligando os nós numerados:

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

7. Construa a lista de adjacência do grafo a partir da matriz associada ao conjunto de rotas:

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

Existe um procedimento de remoção de duplicação de setores, quando duas arestas incidem sobre um mesmo nó, que não será descrito aqui, mas resolve o problema caso ele ocorra.

Após a construção do grafo o controle é passado ao submódulo de análise.

SMAnalisador (Submódulo de Análise de Fluxos): 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 de análise:

1. Distribuir as folgas de acordo com a política determinada pelo módulo administrativo.
2. Executar o balanceamento:
3. Executar o ajuste da ocupação AJUSTA-OCUPAÇÃO-POR-ROTA(Grafo f).
4. Executar EDMONDS-KARP(Grafo f).

Algoritmo: DISTRIBUI-IGUALMENTE()

- 1 Faça q igual a quantidade réplicas de um setor
- 2 Para todos esses setores faça:
- 3 $folga \leftarrow folga/q$

Algoritmo: DISTRIBUI-PRIORIZADO(setor, fluxo, horario)

- 1 Tome as réplicas de um setor
- 2 Para todos esses setores faça:
- 3 $folga \leftarrow folga * parcela(setor, fluxo, horario)$

A função parcela retorna a parcela do fluxo que deve ser associada ao setor no fluxo e horário passados como parâmetro.

Algoritmo: AJUSTA-OCUPACAO-POR-ROTA(Grafo f)

- 1 Tome todas as rotas no fluxo f
- 2 Para cada rota em f faça:
- 3 Para cada setor em rota faça:
- 4 recupere a lista de vôos no setor.
- 5 ordene os vôos pelo tempo de saída mais próximo.
- 6 Para cada setorAtual e setorAnterior da rota, na ordem inversa, faça:
- 7 Para cada vôo $v1$ do setorAtual faça:
- 8 Para cada vôo $v2$ do setorAnterior faça:
- 9 Se (saída de $v1 <$ saída de $v2 -$ separação mínima)
10. incrementa a folga do setor que $v1$ se encontra.

A separação mínima da linha 9 refere-se a uma constante criada para adicionar uma folga de segurança que garanta a saída da aeronave do setor antes da entrada de outra.

Algoritmo: EDMONDS-KARP(Grafo f)

- 1 Enquanto houver um caminho no grafo residual de f faça:
- 2 resíduo \leftarrow menor folga do caminho
- 3 Para cada setor no menor caminho faça:
- 4 fluxo no setor \leftarrow fluxo anterior + resíduo
- 5 fluxo residual no setor $\leftarrow -$ fluxo no setor
- 6 Converta o fluxo computado para taxa de entrada.

Persistência de Dados: Este submódulo tem a função de receber e/ou buscar e formatar os dados para processamento. A busca realiza-se via consulta em uma base de dados onde as tabelas do banco deverão estar armazenadas.

O módulo utiliza um banco de dados gerado pelo Gerenciador MySQL e apresenta as tabelas descritas na Figura 5.3 construída pelo DBDesign. O símbolo ◁► significa a relação de um (claro) para muitos (escuro).

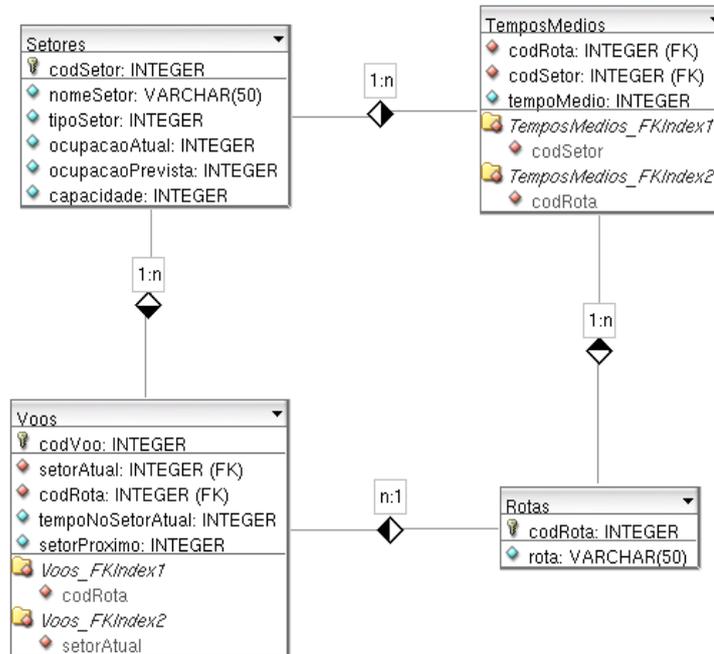


Figura 5.3: Modelo de dados relacional utilizado. Criado no *DBDesign 4*.

A tabela 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. A tabela relacional TemposMedios tem a finalidade de associar para cada Setor e Rota um tempo médio de percorrimento 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. A tabela de Rotas relaciona a cada Rota uma seqüência de caracteres que descrevem a rota. Por exemplo, na Figura 4.7 tem-se uma rota descrita por “T2 S6 S5 T1”. Finalmente a tabela Vôos registra as aeronaves por um código de vôo (`codVoo`), a rota a que pertence (`codRota`), o tempo que ele ocupa o setor atual (`tempoNoSetorAtual`), o código do setor atualmente ocupado e o código do próximo setor a ser ocupado. Essas tabelas representam os dados de entrada do protótipo.

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

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 seqüência 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 6

Implementação

Neste capítulo são apresentadas as informações relativas à implementação do modelo de balanceamento de fluxo aplicado no MBF. Um protótipo deste modelo foi implementado para a simulação de situações típicas e a posterior comparação entre as ações realmente tomadas pelo controle do espaço aéreo. Nesta implementação utilizou-se a plataforma Java (Sun Microsystems, versão 1.5) visando a construção de um sistema portátil e compatível com o sistema SYNCROMAX atualmente em operação no CGNA e o banco de dados relacional MySQL 5.0.45. Também se pode destacar que a escolha da linguagem foi incentivada pela variedade de recursos disponibilizados pela API Java.

6.1 Orientação a Objetos

A Orientação a Objetos trata-se de um paradigma de análise, projeto e programação de sistemas de software baseado na composição e interação entre diversas unidades de software chamadas de objetos. A análise e projeto orientados a objetos têm como objetivo identificar um conjunto de objetos mais adequado para descrever um sistema de software. O funcionamento deste sistema se dá através do relacionamento e troca de mensagens entre estes objetos. Neste paradigma implementa-se um conjunto de classes que representam os objetos presentes no sistema de software. Cada classe determina o comportamento (métodos ou funções membro) e estados (atributos) de seus objetos. Esta classe determina também o relacionamento com outros objetos. Existem linguagens orientadas a objetos (Smalltalk, Python, Ruby, C++, Object Pascal, Java e C#) e linguagens que dão suporte à orientação objetos (Perl (a partir do 5.0), PHP (a partir do 4.0), ColdFusion, Javascript, ActionScript e VB.NET).

Objetos são instâncias de classes, as quais determinam que informação um objeto contenha e como ela pode ser manipulada. Um programa desenvolvido com uma linguagem de programação orientada a objetos manipula estruturas de dados através dos objetos da mesma forma que um programa em linguagem procedural utiliza variáveis e registros.

Um dos grandes diferenciais da programação orientada a objetos em relação a outros paradigmas de programação está no conceito de herança, mecanismo através do qual as definições existentes podem ser estendidas. O Polimorfismo

também tem grande importância na programação orientada a objetos, pois permite selecionar funcionalidades que um programa irá utilizar de forma dinâmica durante a execução. Para uma descrição mais precisa dos conceitos de POO consulte o Apêndice A.

6.2 O Ambiente de Desenvolvimento

Plataforma Java é o nome dado ao ambiente computacional desenvolvido pela Sun Microsystems que especificou o padrão de fato dessa plataforma. É possível o desenvolvimento de diversos aplicativos utilizando as linguagens criadas para a plataforma Java, sendo a linguagem padrão intitulado pelo mesmo nome da plataforma: Linguagem Java. A portabilidade dessa plataforma é bastante elevada, isto quer dizer que um programa construído nessa plataforma pode ser executado em diferentes sistemas operacionais e diferentes equipamentos de hardware. Os programas são parcialmente compilados para um código intermediário denominado *bytecode* e depois interpretado por uma máquina virtual java (MVJ). Uma vez disponível uma MVJ para a arquitetura, qualquer programa pode ser executado sem a necessidade de recompilação do código.

Existe um vasto conjunto de tecnologias dentro do universo Java. A plataforma é subdividida em três sub-plataformas que foram criadas para segmentos específicos de aplicações: (1) Java SE (Java Platform, Standard Edition): é a plataforma base e inclui o ambiente de execução e as bibliotecas comuns. (2) Java EE (Java Platform, Enterprise Edition): É uma edição específica para o desenvolvimento de aplicações corporativas e internet. (3) Java ME (Java Platform, Micro Edition): É uma edição para o desenvolvimento de aplicações para dispositivos móveis e embarcados. Existem ainda sub-plataformas mais específicas como a Java Card que é voltada para dispositivos embarcados com limitações de processamento e armazenamento e JavaFX que é voltada para desenvolvimento de aplicações multimídia em desktop/web (JavaFX Script) e dispositivos móveis (JavaFX Mobile).

6.3 O Ambiente de Execução

São necessários dois componentes para a execução de um programa escrito em Java: a máquina virtual Java e um conjunto de bibliotecas de classe. Essas bibliotecas disponibilizam uma série de serviços para o programa. Esses componentes são conhecidos como JRE (Java Runtime Environment)

A idéia principal da plataforma Java é o conceito de processador "virtual", que executa programas em bytecodes Java. Estes bytecodes são independentes do hardware ou do sistema operacional. A plataforma Java disponibiliza um interpretador (MVJ) que traduz, em tempo de execução, os bytecodes para instruções nativas do processador. Qualquer plataforma computacional que possua uma implementação da máquina virtual pode executar a aplicação sem necessidade de compilação do código.

A partir da versão 1.2 da JRE, a implementação da Sun da MVJ inclui um

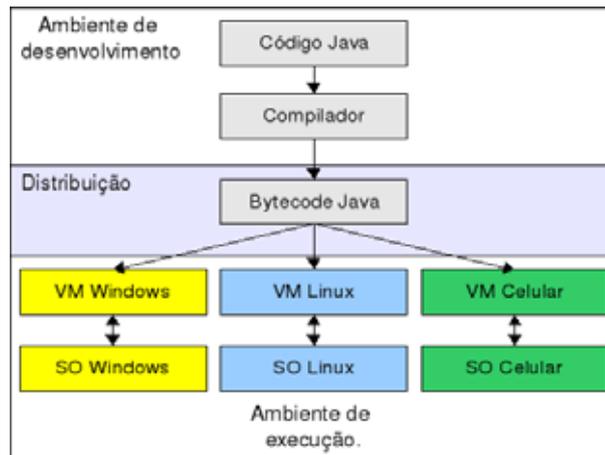


Figura 6.1: Compilação e execução usando Java.

compilador *just-in-time* (JIT). Este compilador possibilita a conversão de todo o bytecode de um programa em instruções nativas. Isto permite um ganho de desempenho muito grande em comparação com a implementação anterior, na qual as instruções em bytecode eram interpretadas repetidas vezes e uma por vez. O compilador JIT pode ser projetado de acordo com a plataforma ou hardware de destino, o código que ele gera pode ser otimizado com base na observação de padrões de comportamento dos programas.

A plataforma Java não é a primeira plataforma baseada no uso de uma máquina virtual, mas é que obteve maior sucesso. A plataforma Java foi desenhada para ser implementada inteiramente em software, à medida que permite a migração de maneira fácil para plataformas de hardware de tipos diferentes.

Os sistemas operacionais modernos disponibilizam uma variedade muito grande de bibliotecas de código reutilizável que facilita o trabalho dos programadores, como a Plataforma Java não depende de nenhum sistema específico ela disponibiliza um conjunto padronizado de bibliotecas de classe, que contém as funcionalidades encontradas nos sistemas operacionais modernos.

Uma classe de biblioteca Java serve a três propósitos dentro da plataforma Java:

1. disponibilizam ao programador um conjunto de funções bem conhecidas que realizam tarefas comuns, como a manutenção de listas de elementos ou manipulação de strings.
2. contém uma interface para tarefas que dependem do hardware e do sistema operacional. Tarefas como acesso a rede e a arquivos são altamente dependentes das capacidades nativas do ambiente.
3. implementam funcionalidades não implementadas usando os recursos disponíveis ou disponibilizam um meio consistente para que a aplicação verifique a presença de determinada funcionalidade.

A popularidade da plataforma Java e o seu conceito *write once, run anywhere* motivaram outros esforços similares. Um destes é a plataforma .NET, da Microsoft, que utilizou muitos dos conceitos e inovações da plataforma Java, porém não

conseguiu implementar os recursos de portabilidade entre sistemas operacionais e plataformas que a plataforma Java possui.

6.4 O Protótipo do Modelo

O módulo de balanceamento de fluxo (MBF) faz parte do SISCONFLUX e tem uma arquitetura descrita na Seção 5.2. Este módulo tem funcionalidades que precisam do suporte dos demais módulos e, como os outros módulos não estão operacionais na data da redação dessa dissertação, os outros módulos serão simulados, para que se possa testar as funcionalidades específicas do MBF.

O protótipo apresenta todos os submódulos previstos na Seção 5.2 e acrescenta-se um conjunto de pacotes geradores de dados que tem a finalidade de simular a tarefas dos outros módulos no SISCONFLUX, um conjunto de pacotes para coleta das informações e apresentação dos resultados. As tabelas de entradas de dados são acessadas em um banco de dados preparado para testes e o protótipo tanto gera quanto consome essas informações. Todas as informações geradas são baseadas nos dados reais obtidos no ACC-BS.

6.5 Implementação do Modelo

O protótipo foi construído usando-se orientação a objetos. As classes foram organizadas em pacotes como mostra a Figura 6.2. Cada pacote armazena um conjunto de classes específicas para a realização de uma determinada tarefa.

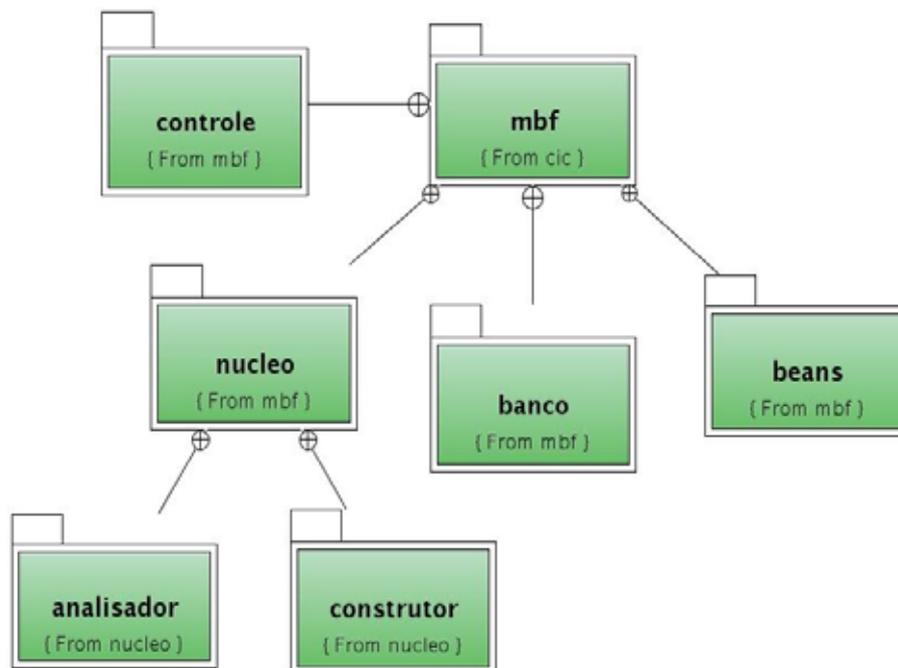


Figura 6.2: Organização dos pacotes do MBF.

O pacote *beans* armazena classes que representam os objetos integrantes do

modelo. Estes objetos básicos são: Setor, Rota, Vôo, Nodo, TempoMedio, VooSetorRota e FilaVooSetorRota. O pacote *banco* armazena as classes com funcionalidades de acesso ao banco de dados: *ConexaoBanco*, *PersisteRotas*, *PersisteSetores*, *PersisteTemposMedios* e *PersisteVoos* (Figura 6.3).

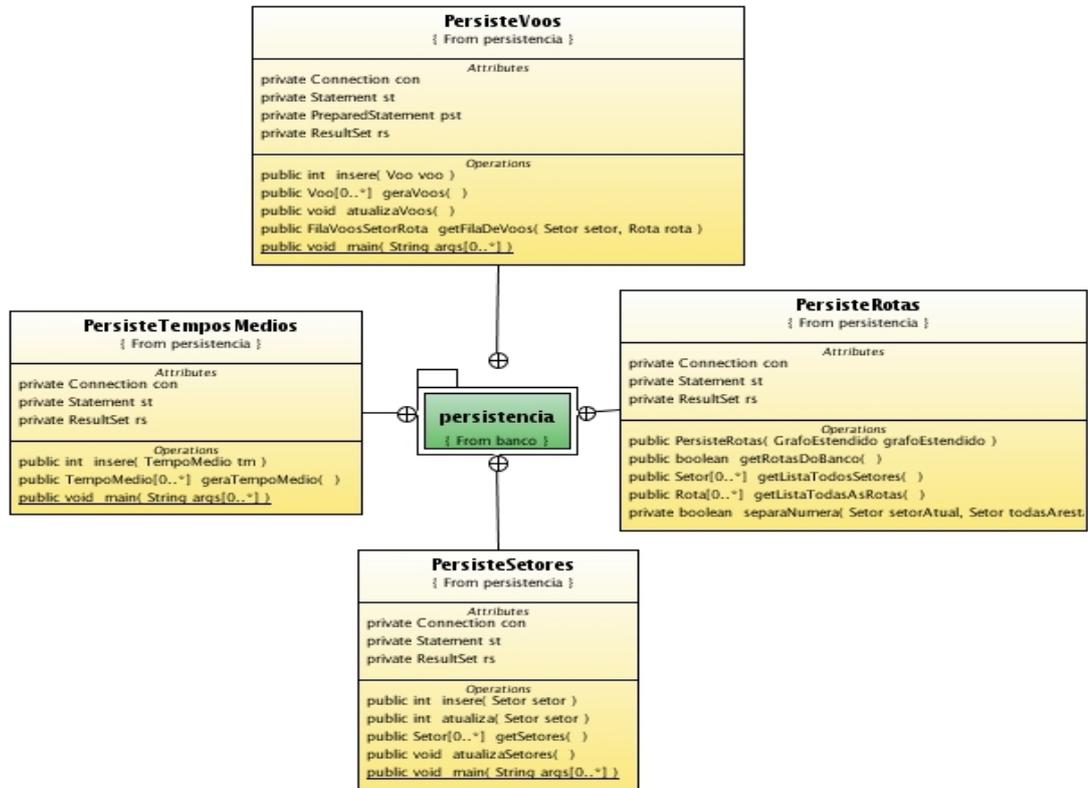


Figura 6.3: Classes de persistência do MBF.

O pacote núcleo tem dois pacotes internos: O Construtor e o Analisador. Ambos trabalham em conjunto para a construção da representação e a análise do fluxo. As classes nucleares estão descritas na Figura 6.4.

O módulo construtor conta com as classes: *SMConstrutorGrafo* que coordena a construção do grafo, *GrafoTMA* que armazena a estrutura na forma de grafo de um TMA específico, *GrafoEstendido* que é a combinação de vários *GrafoTMA* para montar o grafo completo que representa o multi-fluxo e uma classe denominada *FilaNodo* que é uma subestrutura interna ao *GrafoTMA* para armazenamento dos nodos do grafo (Figura 6.5).

O pacote Analisador agrega inteligência ao módulo, pois contém os algoritmos de distribuição e balanceamento. Este pacote possui a classe *SMAAnaliseFluxo* que coordena as ações das demais classes do pacote. A classe *OperadorGrafos* mantém todos os algoritmos necessários para realizar as operações de manipulação, ajuste e balanceamento dos grafos. A classe *EstruturaReferencial* é uma classe que mantém uma estrutura de acesso alternativa ao grafo. Esta estrutura facilita o acesso aos setores e os organiza de forma que este acesso se torna rápido e efetivo. A classe *GrupoDeSetores* faz parte da estrutura da classe *EstruturaDeControle* e

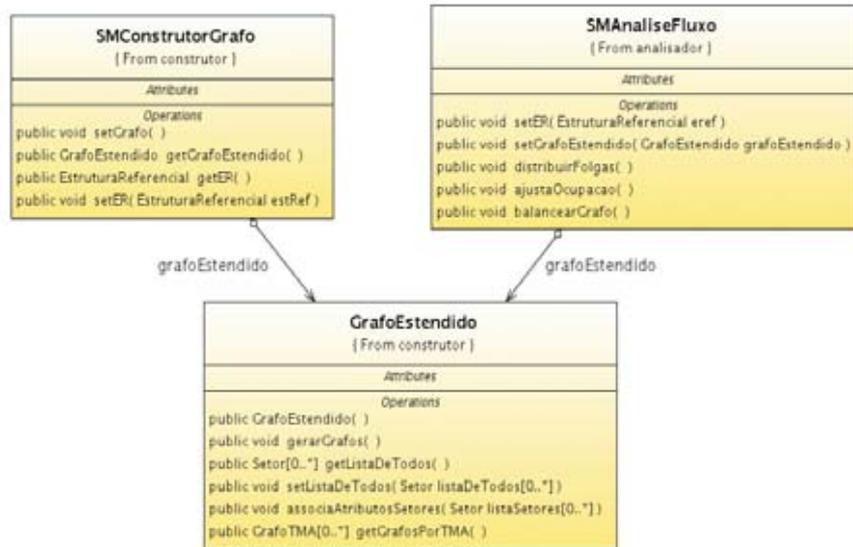


Figura 6.4: Classes centrais do MBF.

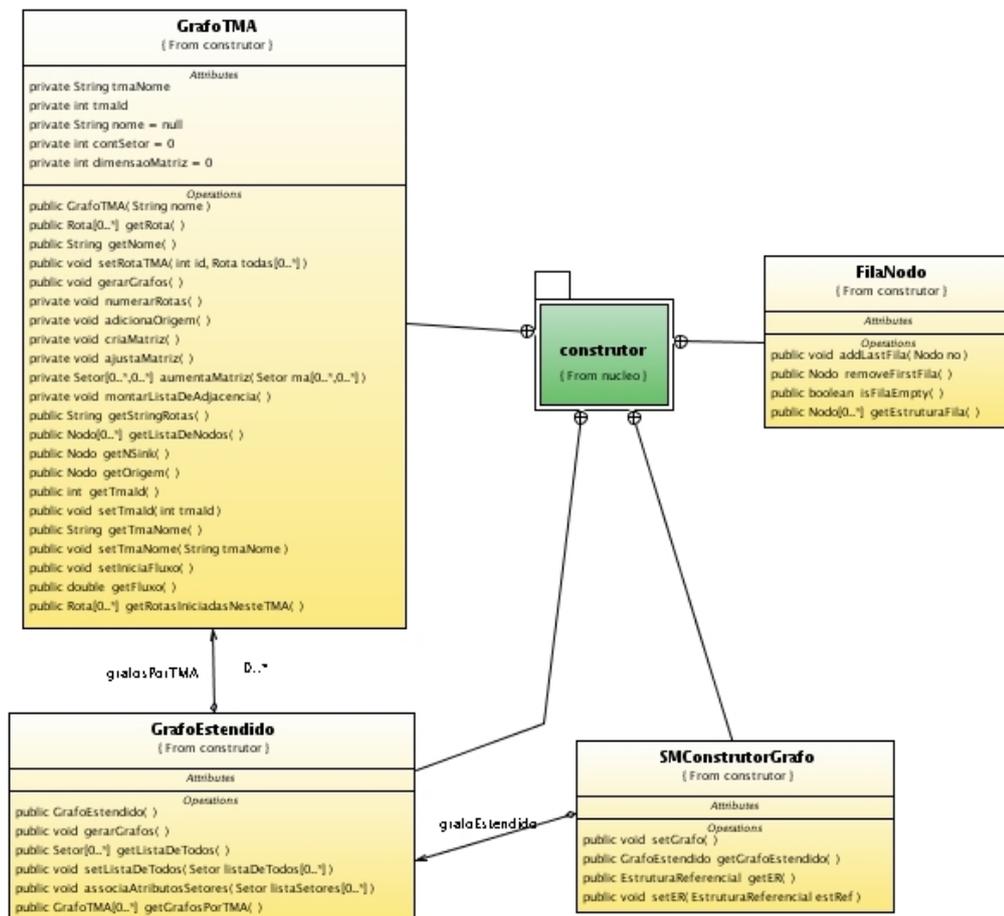


Figura 6.5: Classes para representação em grafos do MBF.

acondiçiona a referência das várias réplicas dos setores em cada fluxo. A classe DistribuidorFolga tem a responsabilidade de distribuir a folga dos setores dentro das várias réplicas contidas em GrupoDeSetores. A classe AjustadorOcupacao tem a tarefa de procurar nas rotas os vôos que sairão do setor antes que outro entre e incrementar a folga do setor caso isso vá acontecer (Figura 6.6).

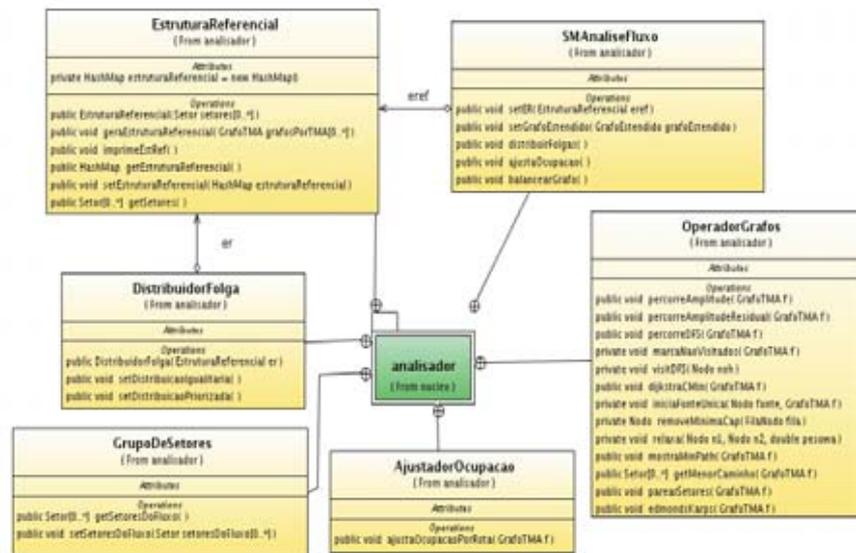


Figura 6.6: Classes para realizar as tarefas propostas pelo MBF.

O diagrama de atividade mostrado na Figura 6.7 descreve como o módulo trabalha. Basicamente ocorre a solicitação de um novo balanceamento, esta solicitação tem origem em outros módulos há duas ações principais dentro do módulo a primeira trata da construção do grafo com base na estrutura armazenada no banco de dados que descreve um cenário projetado pela previsão do cenário. O módulo somente busca no banco a nova representação se está foi atualizada, caso contrário parte-se diretamente para a análise do fluxo. Após o balanceamento ser realizado as informações são incluídas no banco de dados e o módulo administrativo (MAAD) é notificado. O diagrama referencia o MySQL como gerenciador do banco mas pode ser qualquer gerenciador de banco de dados.

O diagrama de seqüência mostrado na Figura 6.8 mostra como os módulos relacionam-se com a camada de controle do MBF e com a persistência. Observa-se que o acesso do construtor é síncrono ao passo que o analisador não tem acesso síncrono, acessando o banco apenas para transferir os resultados para outros módulos.

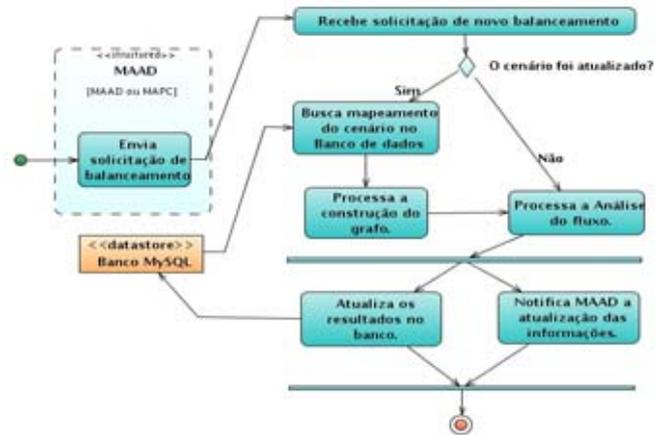


Figura 6.7: Diagrama de atividade do MBF.

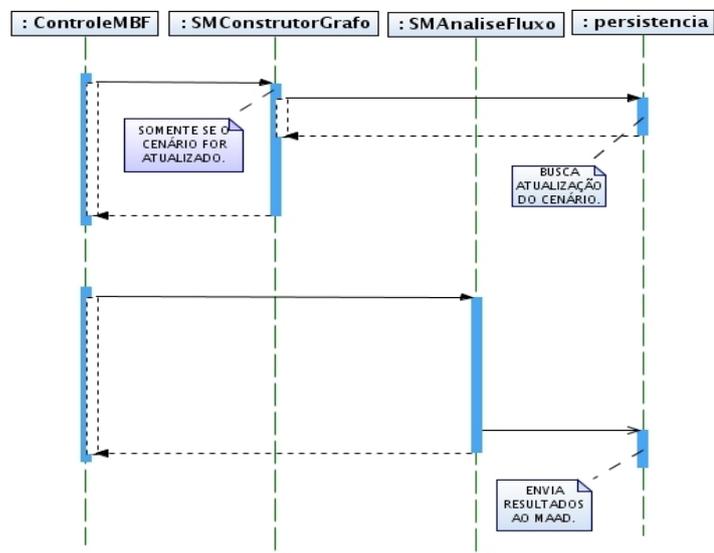


Figura 6.8: Diagrama de seqüência interna ao MBF.

Capítulo 7

Experimentos e Resultados

Este estudo de caso é uma avaliação de compatibilidade entre as ações realizadas para o controle de fluxo aéreo executadas no ACC-BS e as ações sugeridas pelo modelo de balanceamento de fluxo. Foram analisados dois dias distintos, um deles com alto fluxo e outro com baixo fluxo. Este fluxo refere-se à quantidade de vôos que circulam no espaço aéreo. Os dados obtidos foram submetidos ao módulo de balanceamento que sugere a taxa de decolagem nos setores terminais. Finalmente essas taxas são comparadas com as realizadas pelo ACC-BS. Os dados foram obtidos diretamente do CGNA e do CINDACTA I. Foram analisadas duas fontes de dados: um conjunto de gráficos com movimentos aéreos repetitivos (incluídos nos Apêndices B e C deste trabalho) e um conjunto de registro de vôos FPL e RPL (FPL são planos de vôos eventuais e RPL são planos de vôos repetitivos) ocorridos nos dias 30 de abril e 02 de maio de 2008, somando um total de 11540 vôos. Estes vôos foram incluídos no banco de dados descrito na subseção 5.2.1 e eles foram utilizados como base para a realização dos testes. Os gráficos foram úteis para a obtenção da perspectiva de ocupação dos setores em determinados horários considerados críticos. Em virtude das medidas restritivas impostas pelo CGNA terem sido sobre determinados horários, a análise foi concentrada nestes mesmos horários. Os relatórios do CGNA foram incluídos no Apêndice D deste trabalho.

7.1 Planejamento do estudo de caso

Este estudo de caso tem as seguintes fases:

1. Coleta de dados em dois dias pré-determinados com diferenças básicas de ocupação dos setores (quarta-feira e sexta-feira). No cotidiano do ACC-BS a quinta-feira é um dia de alta movimentação enquanto que no sábado o movimento é reduzido em relação à quinta, no entanto devido ao feriado de primeiro de maio esses movimentos são, normalmente, transferidos para o dia anterior ao feriado, por isso foram analisados os dias 30 de abril (quarta-feira) e 02 de maio (sexta-feira). Como a rotina de movimentos aéreos se repete com relativa frequência têm-se dois bons exemplos de movimentação em maior e menor grau de congestionamento.

2. Inserção dos dados no banco para análise no protótipo: Estes dados representam a situação real de trânsito de aeronaves.
3. Definição das políticas de teste: Estas políticas representam a forma de priorização de determinados fluxos em relação ao conjunto de fluxos no multi-fluxo. Como essas políticas dependem do horário e do dia, este item é combinado com o anterior para o ajuste da aplicação da política.
4. Realização dos testes: É a efetiva execução do módulo sobre a base de dados e computação das taxas de entrada sugeridas.
5. Comparação dos testes com a situação real: As ações realizadas no caso real e as ações computadas são comparadas com o auxílio de tabelas.
6. Análise dos resultados: Nesta fase é apresentada uma análise dos resultados obtidos confrontando-os com os dados reais.

A execução do protótipo ocorre de forma controlada e supervisionada. Os dados são atualizados usando-se um conjunto de classes simuladoras e a saída é computada e analisada através de tabelas. Separou-se um conjunto de cinco horários nos quais foram aplicadas medidas restritivas de fluxo. A ocupação dos setores foi simulada com as classes de persistência e a dinâmica das aeronaves simulou-se mediante a obtenção dos vôos ocorridos em intervalos que correspondem ao tempo médio de trânsito em cada setor. Existe uma tabela destinada à priorização do fluxo e relaciona *fluxo* \times *setor* \times *horário* de modo que é possível recuperar a porcentagem designada para cada fluxo que compartilhe um setor em um horário específico. Utiliza-se a tabela 7.1 para o caso de priorização do fluxo com origem em São Paulo (TMA_SP). Observe que as linhas representam os fluxos a partir da origem indicada na primeira coluna. Valores nulos são incluídos quando o setor não faz parte do fluxo. Para efeito de testes preferiu-se priorizar o fluxo a partir de São Paulo (TMA_SP) e distribuir o restante da folga igualmente entre os demais setores do grupo – optou-se por essa divisão igualitária com base na experiência dos profissionais que atuam na área.

Fluxo	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14
TMA_AM	0	0	0.25	0	0	0.2	0.25	0.25	0	0.1	0	0	0	0
TMA_AN	0	0	0	0.1	0.1	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
TMA_BH	0.1	0	0	0	0	0	0.25	0.25	0.3	0.1	0.1	0.3	0	0.25
TMA_BS	0.2	0	0.25	0.1	0.1	0.2	0.25	0.25	0.4	0.1	0.1	0	0	0.25
TMA_CW	0	0.5	0.25	0.1	0.1	0.2	0.25	0	0	0.1	0.1	0	0	0.25
TMA_CY	0	0	0	0	0.1	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
TMA_RE	0.2	0.5	0	0.1	0	0	0	0.25	0	0.1	0.1	0.4	0	0
TMA_RJ	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0.1	0	0.5	0.25
TMA_SP	0.5	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0
TMA_VT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.5	0
TMA_YS	0	0	0.25	0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.1: Distribuição da folga entre os fluxos na malha para priorização do fluxo com origem em São Paulo. A tabela que relaciona o **horário** possui 154 entradas e será omitida.

7.2 Caso 1: Situação de grande movimento

Este estudo refere-se ao dia de alta movimentação aérea na FIR-BS. Basicamente são executadas duas políticas de distribuição de fluxo: uma priorizada e outra igualitária. A política onde as capacidades são divididas igualmente entre os fluxos fica descrita na subseção 7.2.1 e a outra onde as capacidades são intencionalmente direcionadas para o fluxo com origem em São Paulo fica descrita na subseção 7.2.2.

7.2.1 Variação 1: Política de distribuição igualitária

A política de balanceamento é baseada em uma divisão justa e igualitária entre os fluxos da malha. Nesta política a folga dos setores é dividida igualmente entre as réplicas de um mesmo setor, cada réplica pertencente a um fluxo distinto. Esta política é a mais simples, pois não exige a utilização de tabelas de relacionamentos como exigido no caso priorizado.

Horario	Origem	Taxa mínima sugerida	Taxa máxima sugerida	Taxa mínima ocorrida	Medida restritiva
13:25	TMA.SP	6,5	7,5	9,6	não houve
21:13	TMA.SP	9,2	10,0	9,6	não houve
21:45	TMA.SP	6,5	7,5	19,1	separação de 15 min
22:08	TMA.SP	6,5	7,5	9,6	separação de 5 min
22:32	TMA.SP	6,5	7,5	6,4	não houve

Tabela 7.2: Tabela de distribuição igualitária e alta frequência para o fluxo: TMA_SP

As taxas indicadas nas tabelas representam os minutos por aeronave, ou seja, quantos minutos decorrem entre duas aeronaves dentro da terminal. No caso da tabela 7.2 observa-se que a sugestão de entrada ficou abaixo da frequência real em praticamente todas as simulações – Todos os horários são de Greenwich (ou GMT), também conhecidos como horário “Zulu”. O horário real no Brasil corresponde a menos três horas em relação à hora apresentada. Para todas as projeções a simulação indica que se poderia reduzir a restrição imposta que foi de quinze minutos de separação para um valor entre 6,5 e 7,5 minutos sem ultrapassar as restrições de ocupação dos setores.

7.2.2 Variação 2: Política de distribuição com priorização de fluxos

A política de balanceamento nesse caso é focada na priorização de fluxos. A divisão ocorre de acordo com o horário onde determinado fluxo deve ser priorizado entre os fluxos da malha, por isso a necessidade do uso da tabela $fluxo \times setor \times horário$ para simular uma política de distribuição. Esta tabela é muito extensa e não será mostrada aqui. Pode-se salientar que a tabela foi dividida em duas: a primeira relaciona $fluxo \times setor$ e indexa uma das coordenadas da segunda tabela com o $horário$, obtendo-se assim a porcentagem de ocupação relacionando a tripla ($fluxo \times setor \times horário$).

Na tabela 7.3, de priorização do fluxo com origem em São Paulo, a separação cai ainda mais que no caso da distribuição igualitária.

Horario	Origem	Taxa mínima sugerida	Taxa máxima sugerida	Taxa mínima ocorrida	Medida restritiva
13:25	TMA_SP	3,2	3,8	9,6	não houve
21:13	TMA_SP	4,3	5,0	9,6	não houve
21:45	TMA_SP	4,3	5,0	19,1	separação de 15 min
22:08	TMA_SP	4,3	5,0	9,6	separação de 5 min
22:32	TMA_SP	3,2	3,8	6,4	não houve

Tabela 7.3: Tabela de distribuição priorizada e alta frequência para o fluxo: TMA_SP

Comparando-se a distribuição igualitária nas demais terminais, observa-se a subutilização dos setores em virtude dos estrangulamentos de alguns, no entanto os testes indicam que há a possibilidade de aumento das taxas sem comprometimento das capacidades, por exemplo, na tabela 7.4 que mostra dois horários específicos, as retenções nas terminais TMA_YS e FIR_CW seriam aliviadas com uma diminuição de um a dois minutos nos intervalos de decolagens.

Horario	Origem	Taxa mínima sugerida	Taxa máxima sugerida	Taxa mínima ocorrida
13:25	TMA_AN	6,5	7,5	13,1
13:25	TMA_YS	4,3	5,0	15,1
13:25	TMA_CY	13,0	15,0	21,6
13:25	TMA_BS	2,4	3,7	13,1
13:25	TMA_BH	2,3	3,5	13,0
13:25	TMA_RJ	3,2	4,1	21,4
13:25	TMA_VT	2,6	3,9	10,3
13:25	FIR_AM	3,2	4,8	50,4
13:25	FIR_CW	2,9	4,1	15,1
13:25	FIR_RE	2,6	3,9	24,6
21:13	TMA_AN	4,3	5,0	16,8
21:13	TMA_YS	2,6	3,0	5,0
21:13	TMA_CY	13,0	15,0	16,8
21:13	TMA_BS	3,4	4,7	13,1
21:13	TMA_BH	2,9	3,1	23,8
21:13	TMA_RJ	3,9	4,1	21,6
21:13	TMA_VT	2,9	3,1	25,9
21:13	FIR_AM	6,5	7,5	26,7
21:13	FIR_CW	2,9	3,1	5,0
21:13	FIR_RE	2,9	3,1	23,8

Tabela 7.4: Tabela de distribuição igualitária e alta frequência para outros fluxos.

7.3 Caso 2: Situação de baixo movimento

Este estudo é referente a um dia de baixo movimento. Devido ao feriado de primeiro de maio, que caiu numa quinta-feira, o dia considerado foi a sexta-feira. Este caso abrange a aplicação de duas políticas de balanceamento como no caso anterior: Uma onde as capacidades são divididas igualmente entre os fluxos 7.3.1 e outra onde as capacidades são intencionalmente direcionadas para dar maior vazão a determinado fluxo 7.3.2.

7.3.1 Variação 1: Política de distribuição igualitária

A política de balanceamento nesse caso é insensível a qualquer tentativa de priorizar fluxos. A divisão é justa e igualitária entre os fluxos da malha. Nesta política a folga dos setores é dividida igualmente entre as cópias de um mesmo setor, cada cópia pertencente a fluxo distinto. Esta política é a mais simples, pois não exige a utilização da tabela que relaciona *fluxo* \times *setor* \times *horário*.

Horario	Origem	Taxa mínima sugerida	Taxa máxima sugerida	Taxa mínima ocorrida	Medida restritiva
13:25	TMA_SP	6,5	7,5	13,6	não houve
21:13	TMA_SP	6,5	7,5	10,6	não houve
21:45	TMA_SP	4,3	5,0	19,1	separação de 15 min
22:08	TMA_SP	6,5	7,5	10,6	separação de 5 min
22:32	TMA_SP	7,0	9,0	8,4	não houve

Tabela 7.5: Tabela de distribuição igualitária e baixa frequência para o fluxo: TMA_SP

Observa-se, novamente, na tabela 7.5 que as taxas utilizadas poderiam ser menores na maioria dos casos, no entanto para o horário de 22h32min observa-se que a taxa utilizada ficou dentro do intervalo sugerido. Isto indica que a aplicação da taxa ficou no limite, isto é, trabalhou-se com uma taxa ideal para a maximização do fluxo.

7.3.2 Variação 2: Política de distribuição com priorização de fluxos

A política de balanceamento nesse caso é focada na priorização de fluxos. A divisão ocorre de acordo com o horário onde determinado fluxo deve ser priorizado entre os fluxos da malha, daí a necessidade do uso da relação $fluxo \times setor \times horário$ para simular as atualizações do módulo de previsão (MAPC) e as ações de aprendizagem previstas no módulo administrativo (MAAD).

Horario	Origem	Taxa mínima sugerida	Taxa máxima sugerida	Taxa mínima ocorrida	Medida restritiva
13:25	TMA_SP	3,2	3,8	13,6	não houve
21:13	TMA_SP	2,6	3,0	10,6	não houve
21:45	TMA_SP	2,2	2,5	19,5	separação de 15 min
22:08	TMA_SP	2,6	3,0	10,6	separação de 5 min
22:32	TMA_SP	4,3	5,0	8,4	não houve

Tabela 7.6: Tabela de distribuição priorizada e baixa frequência para o fluxo: TMA_SP

No caso priorizado mostrado na tabela 7.6, as taxas são reduzidas devido ao aumento do fluxo a partir de São Paulo e, neste caso, poderia-se diminuir os intervalos de decolagem a partir dessa terminal, porém há um impacto desse procedimento que pode não ser desejado: a redução das taxas de decolagem dos terminais que compartilham setores críticos com a terminal São Paulo.

Com base nos dados obtidos do CINDACTA I que foram submetidos ao protótipo obteve-se, para a terminal São Paulo (TMA_SP), os resultados das tabelas 7.2, 7.3, 7.5 e 7.6. Eles mostram que a distribuição igualitária apresenta bons resultados com taxas de decolagens abaixo das praticadas pelo ACC-BS. A política de priorização utilizada mostrou que a priorização de vários fluxos simultaneamente leva a resultados piores que os obtidos na distribuição igualitária, ou seja, caso deseje-se priorizar algum fluxo deve-se selecionar apenas um ou dois que não exerçam interferência direta entre si. Isto pode ocorrer, por exemplo, quando os fluxos apresentam um único setor de intersecção.

No caso priorizado a definição de uma boa política de priorização, baseada em heurísticas, para determinação da melhor forma de distribuição das capacidades possibilitará um controle mais efetivo sobre os fluxos na malha. Esta Heurística

deve ser inicialmente determinada com orientação do pessoal humano e poderá ser automatizada com o auxílio do módulo de apoio a decisão (MAAD).

7.4 Considerações sobre o Estudo de Caso

A aplicação do modelo tem destaque na possibilidade de ajuste do fluxo, direcionamento do fluxo com priorização de determinados subfluxos. Apresenta a possibilidade de implementação de outras funcionalidades como a análise detalhada de medidas de restrição de fluxo como sugerir um tempo reduzido de órbita, pode sugerir rotas alternativas dentro das rotas apresentadas para a construção do grafo.

Os testes foram elaborados sobre um conjunto de rotas colhidas manualmente e representam apenas uma parte das rotas existentes. O conjunto de dados recebidos apresentava alguns erros e alguns movimentos aéreos foram alterados ou excluídos do conjunto.

7.4.1 Validação do modelo

As tabelas mostram as taxas de decolagem a partir da origem TMA_SP praticadas nos dias 30 e 2 de maio de 2008. Esses dados têm origem no banco de dados do CGNA. Analisou-se o fluxo no setor 01 para determinar o fluxo em um intervalo de tempo que considera o tempo médio de percurso do setor.

Observa-se que o modelo de distribuição igualitária apresenta bons resultados, alguns próximos do real e em outros se sugere trabalhar com valores inferiores aos efetivamente praticados. Por exemplo, no caso do fluxo por volta das 21h13min na tabela 7.2 os dados reais mostram uma taxa de 9,6, em contraste com uma taxa indicada pelo protótipo de 9,2 a 10,0 minutos por decolagem na distribuição igualitária e a taxa de 4,3 a 5,0 minutos por decolagem na distribuição priorizada onde o fluxo com origem em São Paulo foi priorizado. Vê-se, dessa forma, que o modelo tem validade e poderá ser de grande utilidade na regulação do fluxo quando integrado ao sistema SISCONFLUX.

Os resultados mostram que as taxas de decolagens adotadas atualmente garantem uma boa margem de segurança, porém podem ser ajustadas de forma a garantir uma fluência maior de aeronaves mantendo, ainda, os limites de ocupação dentro da faixa do tolerável.

7.5 Avaliação de desempenho

O protótipo rodou nos teste sobre diversas configurações de máquinas (veja tabelas 7.7 e 7.8). A execução do banco de dados foi alternada em outra máquina sob dois meios de transmissão diferentes e na máquina local (localhost).

Os resultados obtidos mostram que o protótipo é bastante eficiente, mesmo executando tarefas de simulação que no ambiente de produção não serão executadas pelo módulo. A atualização deverá ser realizada pelo módulo de previsão de cenário (MAPC), dessa forma projeta-se um bom desempenho mesmo com a adição de outras funcionalidades.

Os melhores resultados foram obtidos com a máquina de dois núcleos que também executava o banco de dados. O processamento em máquinas distintas fica sujeito aos problemas relativos ao meio de transmissão. O pior resultado foi a execução sob a rede de comunicação sem fio que manteve, praticamente o dobro do tempo necessário para o processamento sob a utilização de conexão via cabo *ethernet 10/100*.

Os sistemas operacionais utilizados foram versões da distribuição Linux Ubuntu para Desktop (7.10 e 8.04) com versão do kernel 2.6.22-14-generic #1 SMP i686 e Linux Ubuntu para Servidores (6.06) com versão de kernel 2.6.15-29-server #1 SMP i686. As máquinas utilizadas foram: Um AMD Athlon 2600+ com 1GB de memória RAM, núcleo único, um PC com processador Intel Celeron 800Mhz com 512 MB de memória RAM e núcleo único, e ainda, um *laptop* com processador AMD Turion 64 X2 Mobile Technology com 1GB de memória RAM e núcleo duplo.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Teste 01	CompA	CompB	Wireless 54MB	SO-1	SO-2	8 seg.	13 seg.	7 seg.	13 seg.
Teste 02	CompA	CompB	Wireless 54MB	SO-1	SO-2	8 seg.	14 seg.	7 seg.	13 seg.
Teste 03	CompA	CompB	Wireless 54MB	SO-1	SO-2	8 seg.	14 seg.	7 seg.	12 seg.
Teste 04	CompA	CompB	Wireless 54MB	SO-1	SO-2	8 seg.	14 seg.	7 seg.	12 seg.
Teste 05	CompA	CompB	Wireless 54MB	SO-1	SO-2	7 seg.	13 seg.	7 seg.	13 seg.
Teste 06	CompA	CompB	Ethernet 10/100	SO-1	SO-2	4 seg.	6 seg.	4 seg.	6 seg.
Teste 07	CompA	CompB	Ethernet 10/100	SO-1	SO-2	3 seg.	6 seg.	3 seg.	6 seg.
Teste 08	CompA	CompB	Ethernet 10/100	SO-1	SO-2	3 seg.	6 seg.	3 seg.	6 seg.
Teste 09	CompA	CompB	Ethernet 10/100	SO-1	SO-2	3 seg.	6 seg.	3 seg.	6 seg.
Teste 10	CompA	CompB	Ethernet 10/100	SO-1	SO-2	3 seg.	6 seg.	3 seg.	6 seg.
Teste 11	CompC	CompC	localhost	SO-3	SO-3	2 seg.	3 seg.	2 seg.	3 seg.
Teste 12	CompC	CompC	localhost	SO-3	SO-3	2 seg.	3 seg.	2 seg.	3 seg.
Teste 13	CompC	CompC	localhost	SO-3	SO-3	2 seg.	2 seg.	2 seg.	2 seg.
Teste 14	CompC	CompC	localhost	SO-3	SO-3	1 seg.	2 seg.	1 seg.	2 seg.
Teste 15	CompC	CompC	localhost	SO-3	SO-3	1 seg.	2 seg.	1 seg.	3 seg.

Tabela 7.7: Tabela de desempenho do protótipo nos testes realizados.

Símbolo	Correspondência
C1	Máquina rodando o protótipo.
C2	Máquina rodando o banco de dados.
C3	Meio de transmissão.
C4	Sistema Operacional protótipo.
C5	Sistema Operacional Banco.
C6	Tempo de execução (uma consulta igualitária, sem atualizador).
C7	Tempo de execução (uma consulta igualitária, com atualizador).
C8	Tempo de execução (uma consulta priorizada, sem atualizador).
C9	Tempo de execução (uma consulta priorizada, com atualizador).
CompA	AMD Athlon 2600+, 1GB RAM, Núcleo único.
CompB	Intel Celeron 800Mhz, 512 MB, Núcleo único.
CompC	AMD Turion 64 X2 Mobile Technology, 1GB RAM, Núcleo duplo.
SO-1	Ubuntu-Desktop 8.04 Linux 2.6.22-14-generic #1 SMP i686 GNU/Linux.
SO-2	Ubuntu-Server 6.06 Linux 2.6.15-29-server #1 SMP i686 GNU/Linux.
SO-3	Ubuntu-Desktop 7.10 Linux 2.6.22-14-generic #1 SMP i686 GNU/Linux.

Tabela 7.8: Legenda da Tabela de desempenho do protótipo nos testes realizados.

Capítulo 8

Conclusões

Consideram-se atingidos os objetivos deste trabalho, visto que foi desenvolvido com sucesso um protótipo para o módulo de balanceamento de fluxo que constrói em memória uma representação abstrata a partir de qualquer conjunto de rotas válidas e pré-definidas, além de executar operações de ajuste e distribuição de capacidades dentro desta representação.

Para desenvolver a solução foi necessário grande esforço para compreender o funcionamento do ACC-BS no que diz respeito aos seus processos de trabalho e às regulamentações a que o órgão se submete. Os colaboradores deste centro foram essenciais nessa etapa, fornecendo documentos, trabalhos prévios e possibilitando visitas ao centro de controle para estudo *in loco* e reuniões com os futuros usuários do SISCONFLUX. Durante esse período de pesquisa e levantamento de requisitos trabalhou-se com proximidade das equipes que estão iniciando o desenvolvimento das outras partes do Sistema. Conseguiu-se, após esse período inicial de estabelecimento de diretrizes, fundamentar as bases do modelo para implementação do protótipo.

Com as informações reais fornecidas foi possível realizar os testes. Os experimentos demonstraram que o protótipo é capaz de realizar ajustes satisfatórios e recomendar restrições de taxas de decolagens inferiores às normalmente praticadas sem comprometer a capacidade dos setores e/ou mostrar que, em algumas situações, as restrições utilizadas estiveram dentro da faixa limite para o fluxo.

O uso das metodologias descritas para dar suporte ao Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Brasileiro com a utilização de técnicas de ajuste e balanceamento de fluxo mostrou um bom grau de desempenho e refletiu bons resultados no ajuste dos fluxos internos à malha aérea. Vale destacar que o MBF faz parte de uma solução que prevê a projeção de cenários realizada pelo MAPC e a aplicação de técnicas de aprendizagem por reforço realizada pelo MAAD. A solução visa o aproveitamento da estrutura centralizada que hoje é utilizada no gerenciamento de tráfego aéreo. Os testes realizados são testes de unidade e foi necessário o desenvolvimento de um conjunto de módulos auxiliares para a realização de simulações.

O Módulo de Balanceamento de Fluxo 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 ma-

ximização de fluxo adaptadas da Teoria dos Grafos. O MBF foi desenvolvido como um modelo de análise que determina o tempo de separação entre decolagens a partir das terminais que fazem parte da Região de Informação de vôo de Brasília (FIR-BS) e distribui a folga do fluxo ao longo do espaço aéreo controlado. O objetivo é prevenir ou reduzir o congestionamento nos diversos setores da FIR-BS. Com a previsão de cenário e o módulo de suporte à decisão o MBF pode dar suporte a regulação do fluxo de tráfego auxiliando os controladores e as outras unidades do SISCONFLUX.

Através do desenvolvimento deste sistema os controladores podem adquirir o conhecimento que os auxilie a tomar melhores decisões.

A pesquisa também apresenta os resultados de uma simulação com duas políticas: distribuição igualitária e priorizada do fluxo. Como exemplo mostrou-se que a separação dos tempos de decolagens podem ser reduzidas de 19.1 para 7.5 minutos na distribuição igualitária e 5 minutos na priorizada às 21h45min de 30 de abril de 2008, na terminal São Paulo.

8.1 Avaliação do modelo

O modelo mostrou ser efetivo no balanceamento igualitário, porém no balanceamento priorizado requer uma política de ajuste precisa. A priorização de um determinado fluxo vai reduzir outros fluxos e, por isso, devem-se operar essas políticas mediante a aplicação de critérios bem definidos pela autoridade aeronáutica.

Basicamente o módulo realiza processamento para o ajuste das taxas de saída da terminal que tem relação direta com o problema da espera em solo (GHP - *Ground Holding Problem*). Uma vez definida a taxa de saída nas terminais os órgãos de controle de tráfego das respectivas terminais devem adaptar-se à nova regra e essa adaptação exige os ajustes nos horários dos vôos dentro dos aeródromos.

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, a redução ou aumento da velocidade, etc. Para que o MBF atue na determinação dessas medidas é necessário um conjunto parâmetros que possibilite uma análise mais detalhada de cada vôo dentro dos setores.

Destaca-se que o modelo ainda é apresenta a primeira versão do protótipo, 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 protótipo (veja Seção 8.2).

8.2 Resumo de Contribuições e Pesquisa Futura

Este trabalho é a primeira tentativa, no Brasil, de estabelecer um modelo teórico de balanceamento de fluxo para o cenário real da FIR-BS que detém 50% do fluxo de tráfego aéreo no Brasil. É a primeira implementação com modelo em tecnologia da informação para balanceamento de fluxo no cenário real da FIR-BS

com vistas a facilitar a conexão e complementação do sistema SYNCROMAX e o atual sistema do CINDACTA I. Apresenta uma análise de estudo de caso com cenários comuns de congestionamento sob dados reais e recentes para a obtenção de informações de suporte à decisão para autoridades e especialistas do DECEA e ANAC. É um sistema de software com propriedade nacional para aplicação no gerenciamento de tráfego aéreo brasileiro. No meio acadêmico, é uma experiência de sucesso na integração da UnB com a indústria (Atech) e os usuários finais do sistema (DECEA, ACC-BS) e obteve sucesso com uma publicação internacional na vigésima Conferência Internacional de Engenharia de Software e Engenharia de Conhecimento (SEKE - International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering) no ano de 2008 [de Souza et al. 2008].

Como estudos futuros têm-se a previsão da aplicação de técnicas de negociação baseada em teoria dos jogos para resolver os conflitos internos pertinentes à análise das medidas restritivas críticas onde se pode procurar um melhor equilíbrio global de forma que o prejuízo das medidas sejam pulverizados no conjunto de setores e não penalizando um ou outro determinado setor.

É pertinente ao problema, e possível, a implementação de recursos para o cálculo de tempo de órbita. Aeronaves em vôo podem sofrer restrições de velocidade ou efetuar esperas em determinados pontos pré-estabelecidos. Com base na estrutura desenvolvida no modelo este tipo de ajuste pode ser implementado sem grandes problemas. A análise da previsão do tempo de permanência das aeronaves em setores adjacentes aos setores congestionados pode sugerir ajustes de velocidade e/ou ajuste de rota alternativa por setores com disponibilidade.

Pode-se melhorar os resultados usando-se como parâmetro de escolha do algoritmo de Edmonds-Karp a escolha do caminho com a maior frequência de utilização. O uso do menor caminho não garante que o ajuste de fluxo em todos os setores sejam bons, garante apenas que no início do fluxo a taxa de entrada é a maior possível dadas as futuras configurações da malha.

Outra possibilidade de contribuição do modelo é a possibilidade do módulo sugerir rotas que possibilitem aliviar a ocupação de setores em vias de saturação, pelo ajuste do fluxo em rotas alternativas.

Como trabalho futuro, está prevista a execução deste protótipo em um ambiente real, especificamente no CINDACTA I, com a associação do MBF e os demais módulos do sistema e seu funcionamento paralelo com os procedimentos operacionais sendo realizados.

Referências

- [Alves et al. 2006] Alves, D. P., Weigang, L., e Souza, B. B. (2006). Uso de aprendizagem por reforço e controle em nível meta para melhorar a performance da comunicação em gerência de tráfego aéreo. In *In Proceedings of V Simpósio de Transporte Aéreo (V SITRAER)*, volume 1, pages 337–344.
- [ATECH 2007] ATECH, T. C. (2007). Gerenciador de fluxo de tráfego aéreo - SYNCROMAX, Negócios e Produtos. Publicação via Internet. http://www.atech.br/_new/site/negocios/produtos.php?id=126.
- [Ball et al. 2003] Ball, M. O., Hoffman, R., Odoni, A., e Rifkin, R. (2003). A stochastic integer program with dual network structure and its application to the ground holding problem. *Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS)*, 51:167–171. ISSN:0030-364X.
- [Benson e Aspin 2008] Benson, T. e Aspin, C. (2008). Linhas aéreas crescem na a. latina mesmo com alta de combustível. Internet.
- [CGNA 2005] CGNA (2005). O controle do espaço aéreo - principais atividades. Publicação, Departamento de Controle do Espaço Aéreo, Rio de Janeiro. Vários autores.
- [Cormen et al. 1998] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., e Rivest, R. L. (1998). *Introduction to Algorithms*. McGraw-Hill Book Company. ISBN: 0-07-013143-0.
- [Crespo et al. 2007] Crespo, A. M. F., Aquino, C. V. d., Souza, B. B. d., Weigang, L., Melo, A. C. M. A. d., e Alves, D. P. (2007). *Sistema Distribuído de Apoio A Decisão Aplicado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego: Caso CINDACTA I*. In *VI Simpósio de Transporte Aéreo (VI SITRAER 2007)*, volume 1, pages 317–327.
- [de Souza et al. 2008] de Souza, B. B., Weigang, L., Crespo, A. M. F., e Celestino, V. R. R. (2008). Flow balancing model for air traffic flow management. In *to appear in the proc. of Twentieth International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE'08)*, California, USA.
- [DECEA 2006] DECEA, Departamento de Controle de Espaço Aéreo, D. d. I. A. (2006). Regras do ar e serviços de tráfego aéreo. ICA 100-12.

- [Dib 2004] Dib, M. V. P. (2004). *ATFSM-MAS - Air Traffic Flow Synchronization and Management Multi-Agents System (Sistema Multi-agentes para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego aéreo)*. Master's thesis, Universidade de Brasília.
- [Dinic 1970] Dinic, E. A. (1970). Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation. *Soviet Math*, 11:1277–1280. Doklady.
- [EFE 2008] EFE, C. N. D. A. (2008). A crise nos eua não reduzirá tráfego aéreo de passageiros, diz airbus. Internet. jueves.
- [Heymann et al. 2003] Heymann, M., Meyer, G., e Resmerita, S. (2003). A framework for conflict resolution in air traffic management. In *Proceedings, 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 2, pages 2035–2040, Maui, Hawaii. Digital Object Identifier 10.1109/CDC.2003.1272914.
- [Hoffman 1997] Hoffman, H. (1997). *Integer Programming Models For Ground-Holding in Air Traffic Flow Management*. PhD thesis, University of Maryland.
- [Lin e de Souza Mota 2007] Lin, M. T. N. G. e de Souza Mota, E. (2007). Programming in logic - os fundamentos da linguagem prolog. http://www.dcc.fua.br/dcc_lp/p_logica/prolog/lp_prolog.html, Acessado em 05 de Dezembro de 2007. Departamento de Ciência da Computação, Universidade do Amazonas.
- [Liu et al. 2006] Liu, P.-C. B., Hansen, M., e Mukherjee, A. (2006). Scenario-based air traffic flow management: Developing and using capacity scenario trees. In *TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM*, page 15. Paper revised from original submittal.
- [Ma et al. 2004] Ma, Z., Cui, D., e Cheng, P. (2004). Dynamic network flow model for short-term air traffic flow management. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 34(3):351–358. Work supported by National Natural Science Foundation of China under Project 69784004.
- [Microsystems 2008] Microsystems, S. (2008). Object-oriented programming concepts. Internet. <http://java.sun.com/docs/books/tutorial/java/concepts/>.
- [Mukherjee 2004] Mukherjee, A. (2004). *Dynamic Stochastic Optimization Models for Air Traffic Flow Management*. PhD thesis, University of California, Berkeley. UCB-ITS-DS-2004-3.
- [Netto 2001] Netto, P. O. B. (2001). *Grafos - Teoria, Modelos, Algoritmos*, volume 1. Editora Edgard Blücher LTDA, 2 edition.
- [Peng et al. 2001] Peng, C., Deguang, C., e Cheng, W. (2001). Optimization-based model for short-term air traffic flow management. *The transaction of Tsinghua University*, 41(4/5):163–166.

- [Richetta e Odoni 1993] Richetta, O. e Odoni, A. R. (1993). Solving optimally the static ground-holding policy problem in air traffic control. *Transportation Science*, 27:228–238.
- [Rifkin 1998] Rifkin, R. M. (1998). The static stochastic ground-holding problem. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [Rizzi 2003] Rizzi, J. A. (2003). Um modelo matemático de auxílio para o problema de controle do tráfego aéreo. Master’s thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, SP, Brasil.
- [Rolim et al. 2004] Rolim, T. H. L., de Almeida Portela, T. A., e Roberto de Almeida Alves, T. (2004). O controle do espaço aéreo. Technical report, DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo. ASCOM/DECEA.
- [Russell e Norvig 2004] Russell, S. e Norvig, P. (2004). *Inteligência Artificial*. Editora Campus, 2th edition.
- [Sekhavat e Sastry 1998] Sekhavat, S. e Sastry, S. (1998). A distributed automatic air traffic management system. *Anais International Symposium on Robotics and Automation*. Saltillo, Coahuila, México.
- [Staniscia e Filho 2008] Staniscia, G. F. e 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 2008*, pages 74–76.
- [Swenson et al. 2006] Swenson, H., Barhydt, R., e Landis, M. (2006). Next generation air transportation system (ngats) air traffic management (atm) airspace project. Technical report, National Aeronautics and Space Administration. External Release Version.
- [Szwarcfiter 1984] Szwarcfiter, J. L. (1984). *Grafos e Algoritmos Computacionais*, volume 1. Editora Campus LTDA, 1 edition.
- [Weigang 1994] Weigang, L. (1994). *Knowledge-Based System for Air Traffic Flow Management and Centralized Flow Control*. PhD thesis, Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, São Paulo.
- [Zhang et al. 2005] Zhang, Z., Gao, W., e Wang, L. (2005). Short-term flow management based on dynamic flow programming network. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6:640–647.

Apêndice A

Glossário

Abstração é a habilidade de concentrar nos aspectos essenciais de um contexto qualquer, ignorando características menos importantes ou acidentais. Em modelagem orientada a objetos, uma classe é uma abstração de entidades existentes no domínio do sistema de software [Microsystems 2008].

Associação é o mecanismo pelo qual um objeto utiliza os recursos de outro. Pode tratar-se de uma associação simples “usa um” ou de um acoplamento “parte de”. Por exemplo: Um vôo usa uma Rota. O Setor 2 faz parte da Rota do vôo.

Atributos são características de um objeto. Basicamente a estrutura de dados que vai representar a classe. Exemplos: Setor: código do setor, nome, capacidade, ...; Vôo: código do vôo, rota, setor atual, ...; Grafo: conjunto de nodos, nodo inicial. Estes atributos possuem valores. Por exemplo, o atributo setor atual pode conter o valor 201 que é o código do setor 01.

Classe representa um conjunto de objetos com características afins. Uma classe define o comportamento dos objetos através de métodos e os estados ele é capaz de manter através de atributos. Exemplo de classe: Os setores.

Encapsulamento consiste na separação de aspectos internos e externos de um objeto. Este mecanismo é utilizado amplamente para impedir o acesso direto ao estado de um objeto (seus atributos), disponibilizando externamente apenas os métodos que alteram estes estados. Exemplo: você não precisa conhecer os detalhes de um motor a combustão para utilizá-lo. Os controles do veículo encapsulam esses detalhes e provêem uma interface amigável (pedais, volante, alavanca do câmbio).

Herança (ou generalização) é o mecanismo pelo qual uma classe (sub-classe) pode estender outra classe (super-classe), aproveitando seus comportamentos (métodos) e estados possíveis (atributos). Há Herança múltipla quando uma subclasse possui mais de uma superclasse. Essa relação é normalmente chamada de relação “é um”. Um exemplo de herança: Mamífero é super-classe de Humano. Ou seja, um Humano é um mamífero.

Interface é uma padronização contratada entre a classe e o mundo externo. Quando uma classe implementa uma interface, ela está comprometida a fornecer o comportamento publicado pela interface.

Mensagem é uma chamada a um objeto para invocar um de seus métodos, ativando um comportamento descrito por sua classe. Também pode ser direcionada diretamente a uma classe (através de um método estático).

Métodos definem as habilidades dos objetos. O grafo com origem em Brasília é uma instância da classe GrafoTMA, portanto tem habilidade de listar setores e rotas neste grafo, implementada através do método `getSetores()` e `getRotasIniciadasNesteTMA()`. Um método em uma classe é apenas uma definição. A ação só ocorre quando o método é invocado através do objeto. Dentro do programa, a utilização de um método deve afetar apenas um objeto em particular.

Objeto é uma instância de uma classe. Um objeto é capaz de armazenar estados através de seus atributos e reagir a mensagens enviadas a ele, assim como se relacionar e enviar mensagens a outros objetos. Exemplo de objetos da classe Setores: S01, S02, S03.

Pacotes são referências para organização lógica de classes e interfaces.

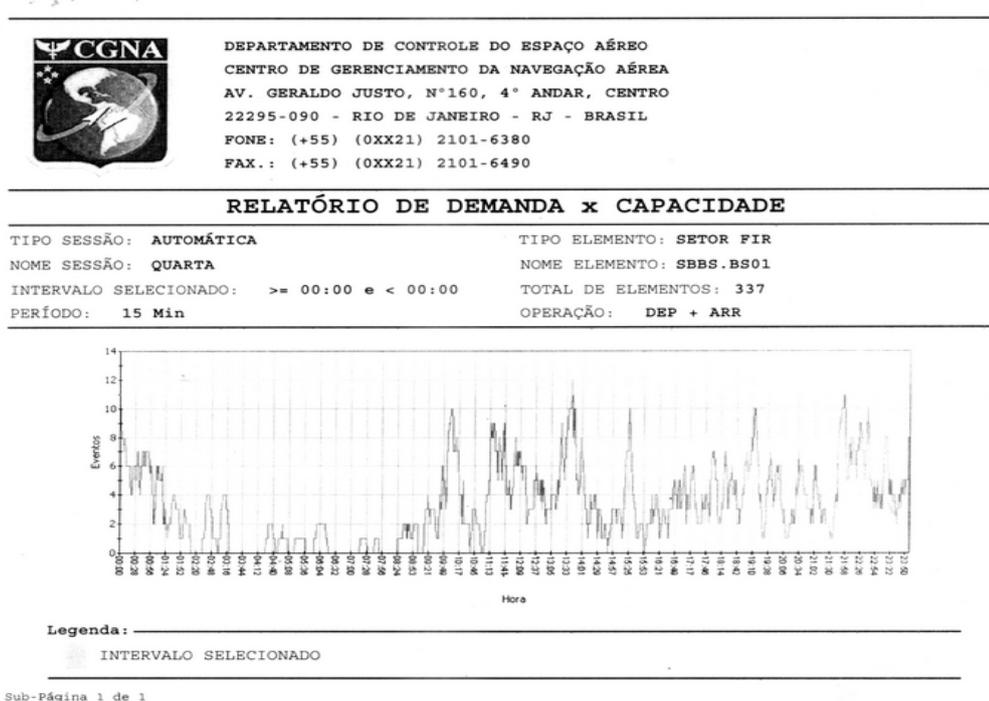
Polimorfismo é o princípio pelo qual duas ou mais classes derivadas de uma mesma superclasse podem invocar métodos que têm a mesma assinatura (lista de parâmetros e retorno) mas comportamentos distintos, especializados para cada classe derivada, usando para tanto uma referência a um objeto do tipo da superclasse. A decisão sobre qual o método que deve ser selecionado, de acordo com o tipo da classe derivada, é tomada em tempo de execução, através do mecanismo de ligação tardia. No caso de polimorfismo, é necessário que os métodos tenham exatamente a mesma identificação, sendo utilizado o mecanismo de redefinição de métodos. Esse mecanismo de redefinição não deve ser confundido com o mecanismo de sobrecarga de métodos.

Sobrecarga é a utilização do mesmo nome para símbolos ou métodos com operações ou funcionalidades distintas. Geralmente diferencia-se os métodos pela sua assinatura [Microsystems 2008].

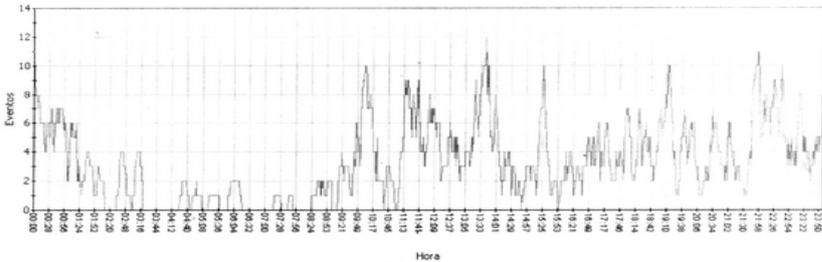
Apêndice B

Gráficos do CGNA

B.1 Dados de um dia de alto fluxo.



RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE



Legenda:
 [] INTERVALO SELECIONADO

Figura B.1: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

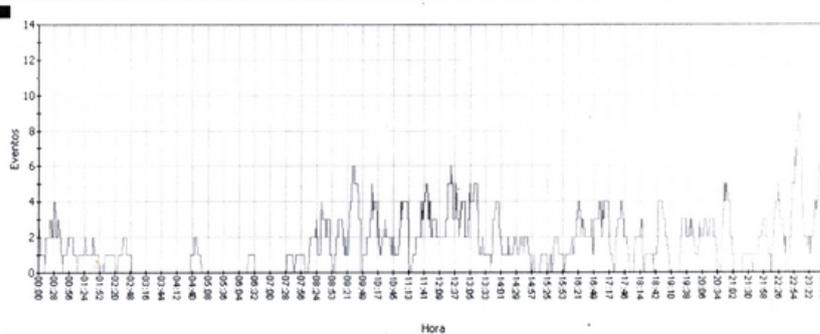
NOME ELEMENTO: SBBS.BS02

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 179

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.2: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

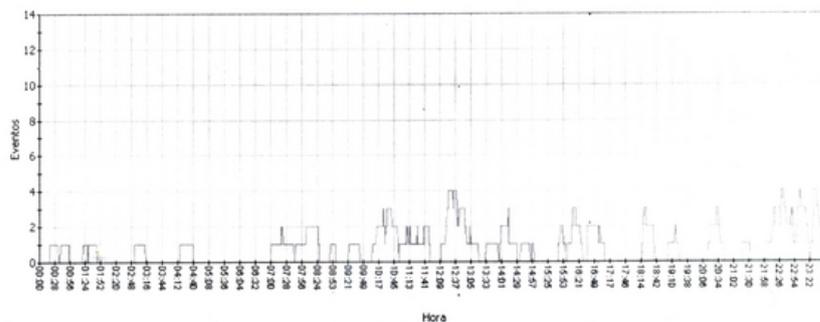
NOME ELEMENTO: SBBS.BS03

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 70

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.3: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

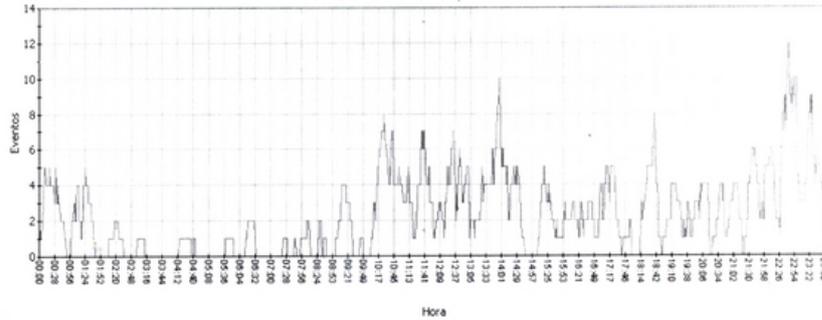
NOME ELEMENTO: SBBS.BS04

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 222

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR

**Legenda:**■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.4: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

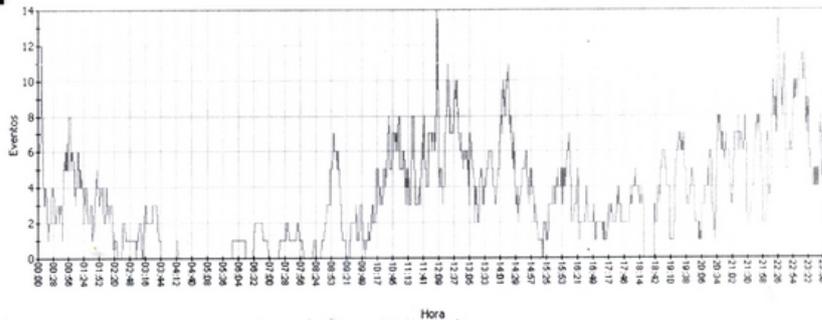
NOME ELEMENTO: SBBS.BS05

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 376

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR

**Legenda:**■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.5: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

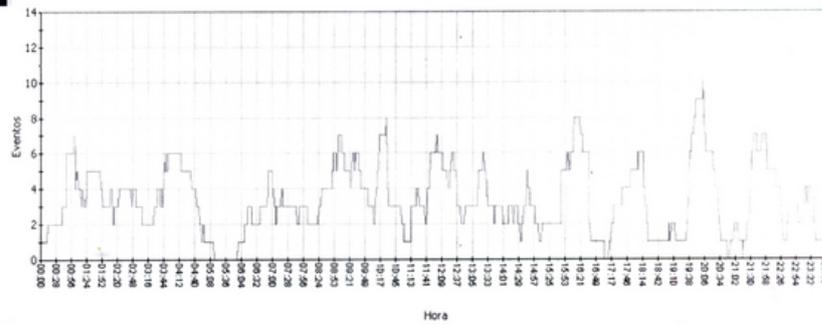
NOME ELEMENTO: SBBS.BS06

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 116

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.6: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

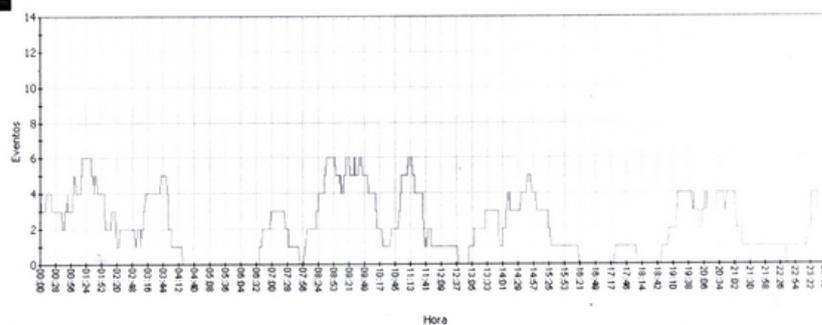
NOME ELEMENTO: SBBS.BS07

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 68

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

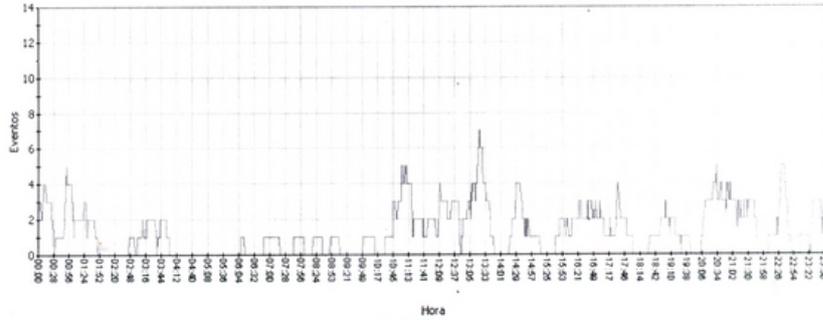
INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.7: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA TIPO ELEMENTO: SETOR FIR
NOME SESSÃO: QUARTA NOME ELEMENTO: SBBS.BS08
INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00 TOTAL DE ELEMENTOS: 112
PERÍODO: 15 Min OPERAÇÃO: DEP + ARR



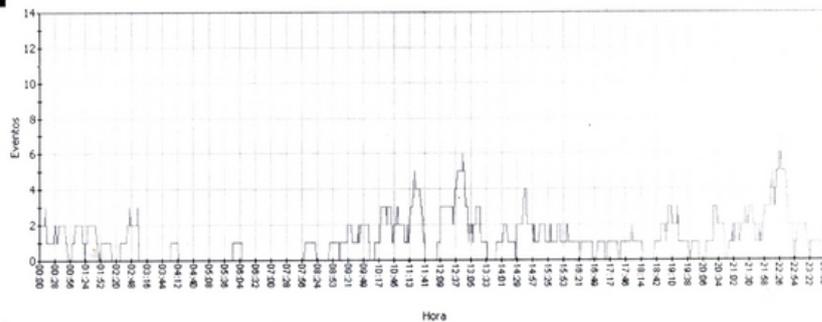
Legenda:
■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.8: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA TIPO ELEMENTO: SETOR FIR
NOME SESSÃO: QUARTA NOME ELEMENTO: SBBS.BS09
INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00 TOTAL DE ELEMENTOS: 93
PERÍODO: 15 Min OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:
■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.9: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

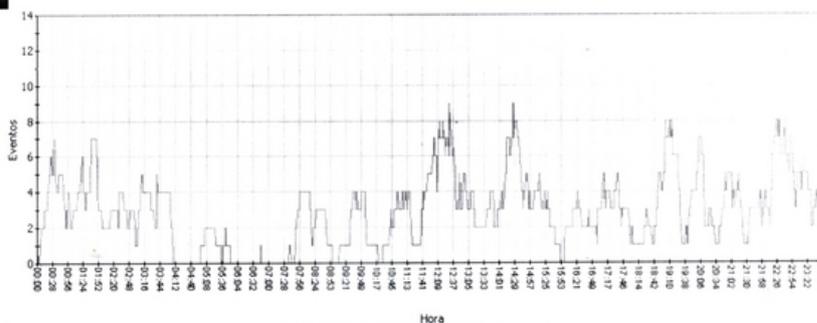
NOME ELEMENTO: SBBS.BS10

INTERVALO SELECIONADO: $\geq 00:00$ e $< 00:00$

TOTAL DE ELEMENTOS: 186

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:
 ■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.10: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

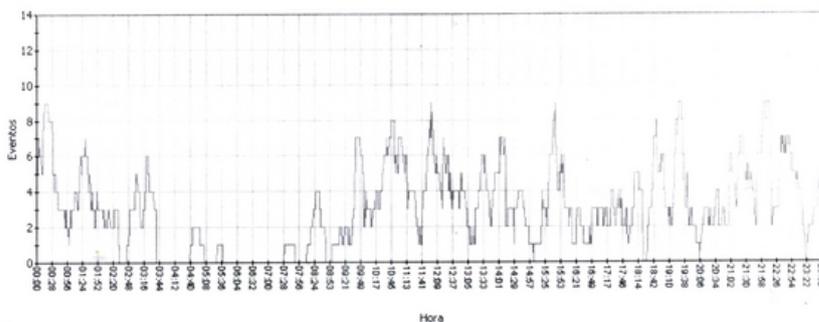
NOME ELEMENTO: SBBS.BS11

INTERVALO SELECIONADO: $\geq 00:00$ e $< 00:00$

TOTAL DE ELEMENTOS: 250

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



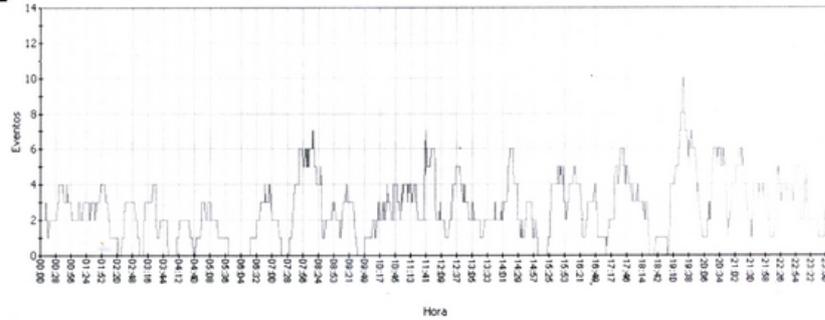
Legenda:
 ■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.11: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA TIPO ELEMENTO: SETOR FIR
NOME SESSÃO: QUARTA NOME ELEMENTO: SBBS.BS12
INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00 TOTAL DE ELEMENTOS: 184
PERÍODO: 15 Min OPERAÇÃO: DEP + ARR



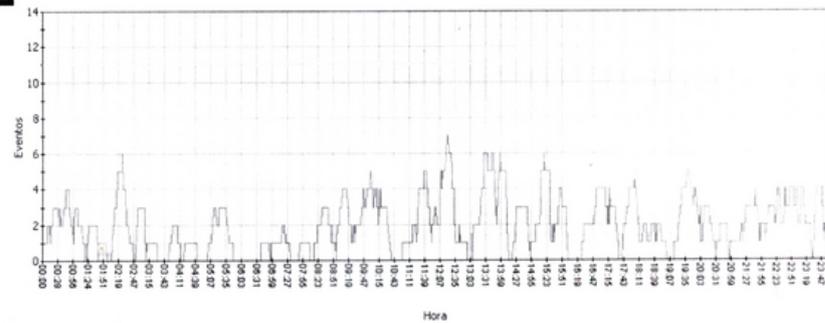
Legenda:
■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.12: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA TIPO ELEMENTO: SETOR FIR
NOME SESSÃO: QUARTA NOME ELEMENTO: SBCW.CW13
INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00 TOTAL DE ELEMENTOS: 145
PERÍODO: 15 Min OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:
■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.13: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: QUARTA

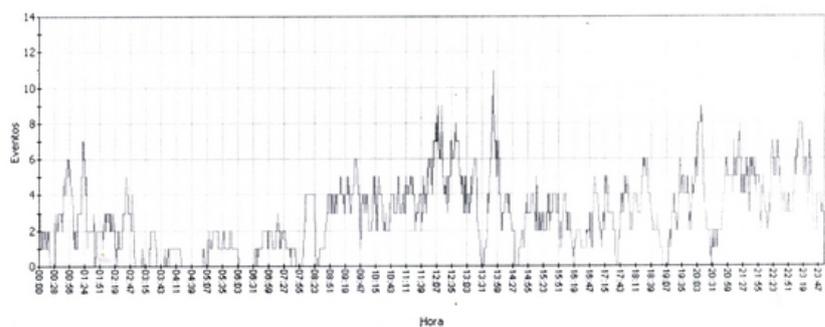
NOME ELEMENTO: SBCW.CW14

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 327

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura B.14: Gráfico obtido do CGNA

Apêndice C

Gráficos do CGNA

C.1 Dados de um dia de baixo fluxo.

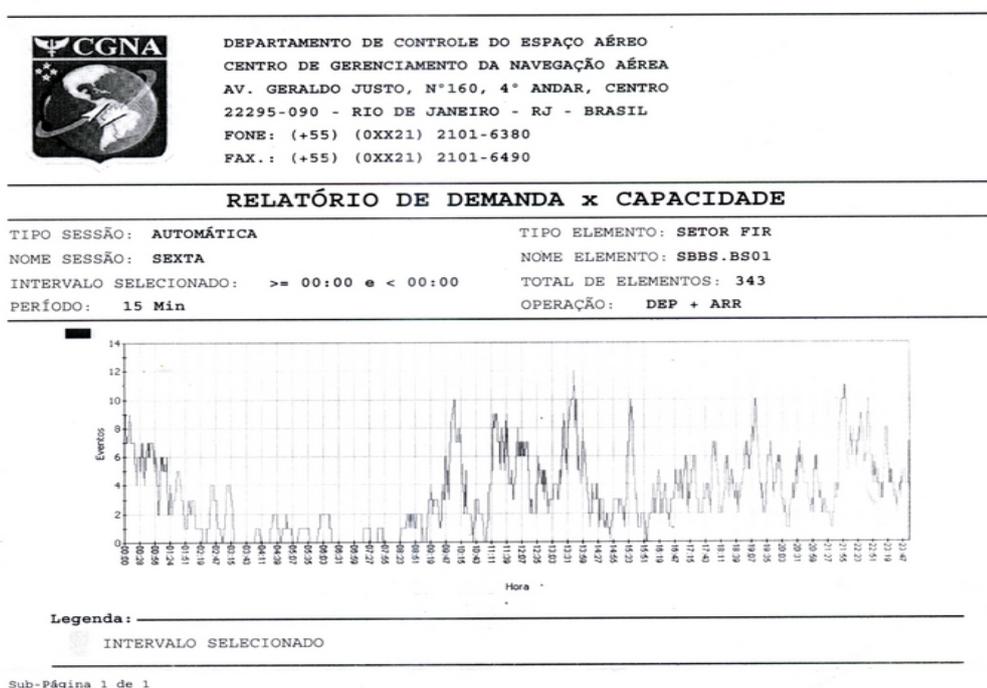


Figura C.1: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

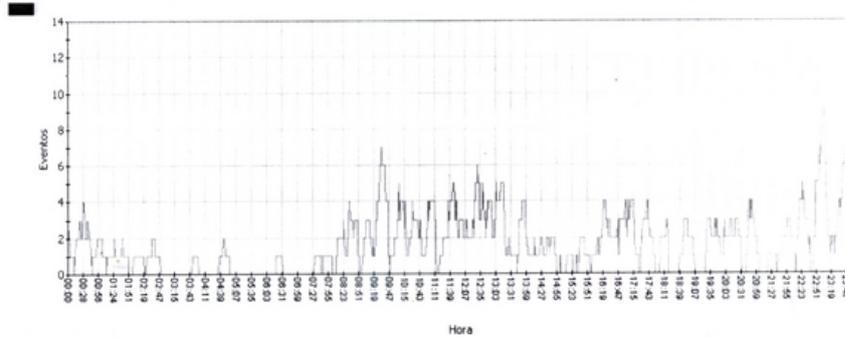
NOME ELEMENTO: SBBS.BS02

INTERVALO SELECIONADO: $\geq 00:00$ e $< 00:00$

TOTAL DE ELEMENTOS: 179

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.2: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

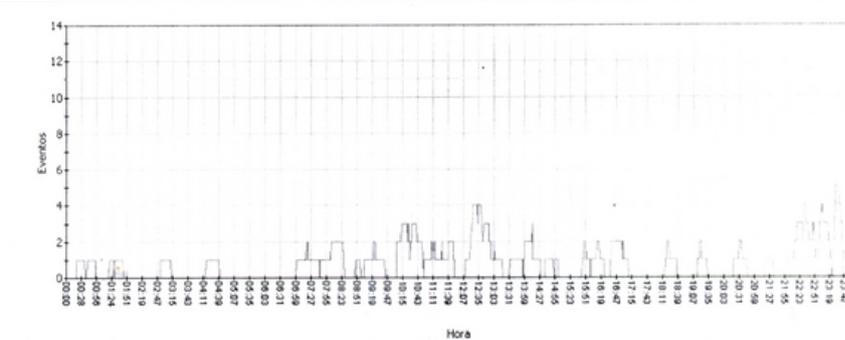
NOME ELEMENTO: SBBS.BS03

INTERVALO SELECIONADO: $\geq 00:00$ e $< 00:00$

TOTAL DE ELEMENTOS: 70

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.3: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

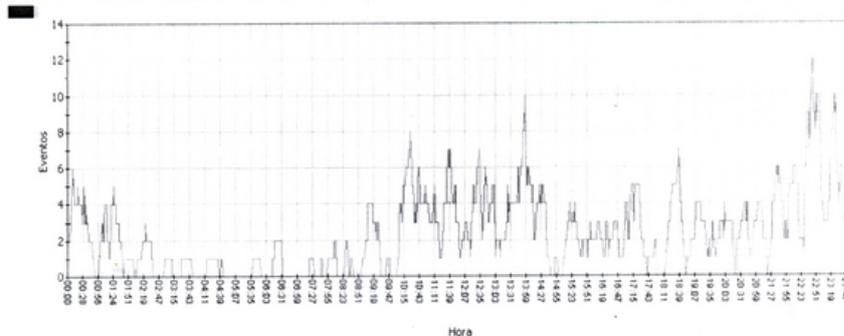
NOME ELEMENTO: SBBS.BS04

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 226

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda: INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.4: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

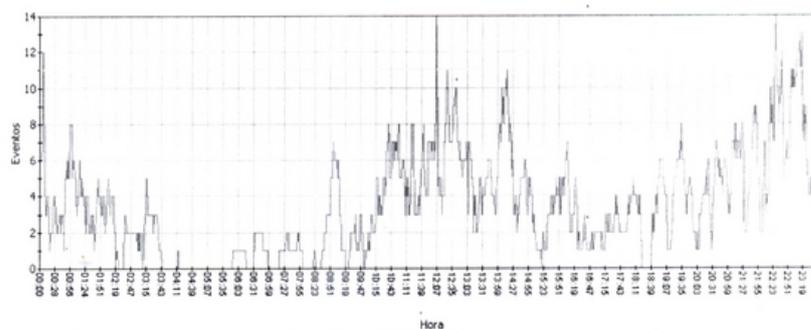
NOME ELEMENTO: SBBS.BS05

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 381

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



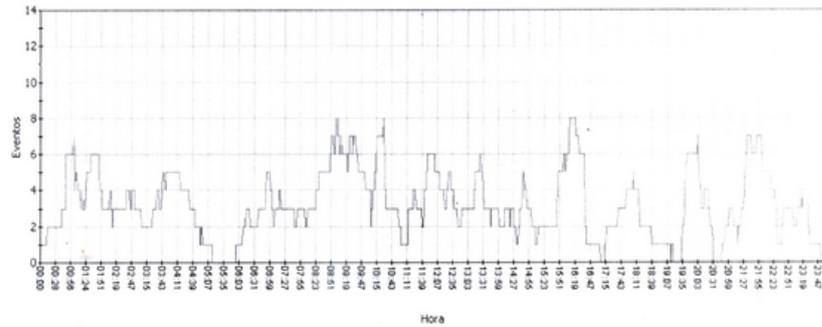
Legenda: INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.5: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA TIPO ELEMENTO: SETOR FIR
NOME SESSÃO: SEXTA NOME ELEMENTO: SBBS.BS06
INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00 TOTAL DE ELEMENTOS: 113
PERÍODO: 15 Min OPERAÇÃO: DEP + ARR



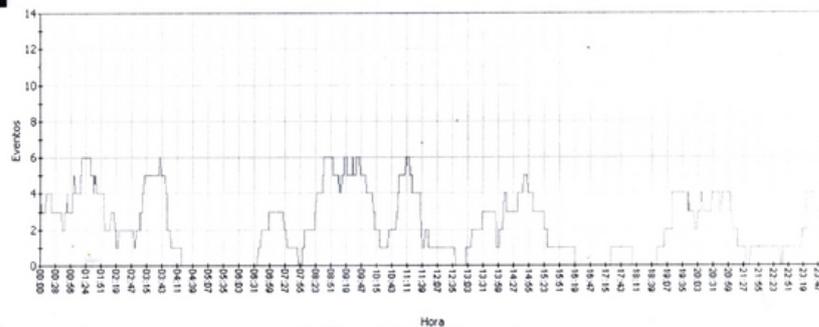
Legenda:
■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.6: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA TIPO ELEMENTO: SETOR FIR
NOME SESSÃO: SEXTA NOME ELEMENTO: SBBS.BS07
INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00 TOTAL DE ELEMENTOS: 69
PERÍODO: 15 Min OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:
■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.7: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

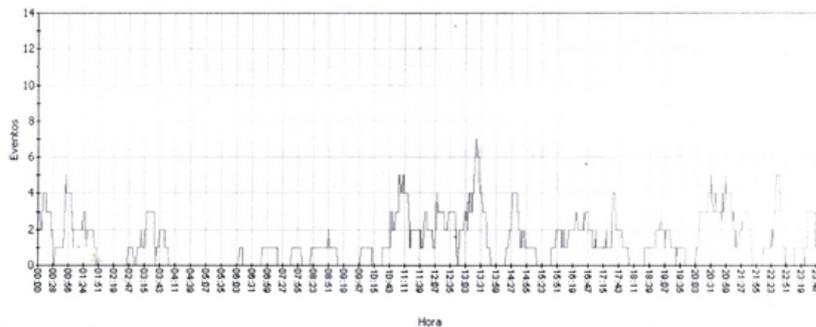
NOME ELEMENTO: SBBS.BS08

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 114

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.8: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

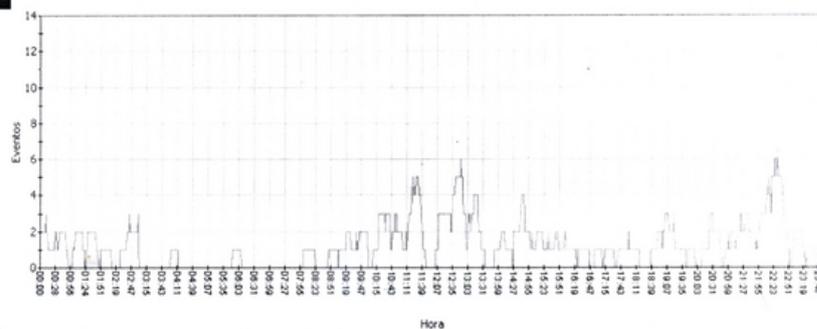
NOME ELEMENTO: SBBS.BS09

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 95

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.9: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

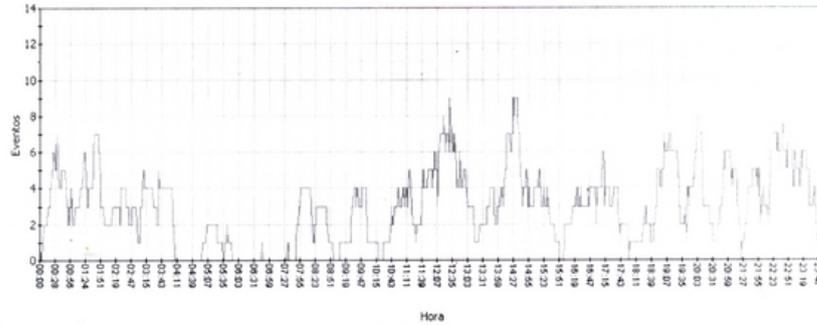
NOME ELEMENTO: SBBS.BS10

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 192

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.10: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

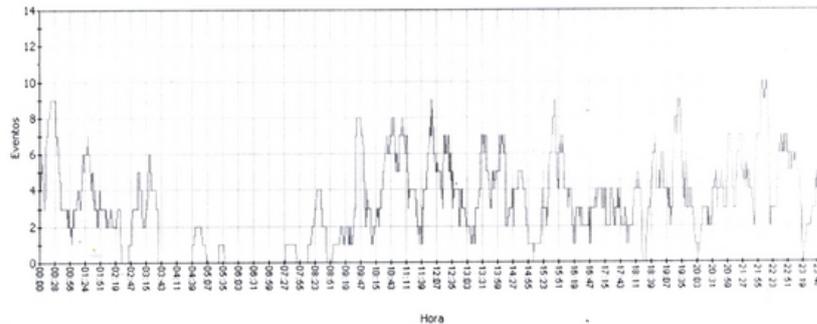
NOME ELEMENTO: SBBS.BS11

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 260

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.11: Gráfico obtido do CGNA

RELATÓRIO DE DEMANDA x CAPACIDADE

TIPO SESSÃO: AUTOMÁTICA

TIPO ELEMENTO: SETOR FIR

NOME SESSÃO: SEXTA

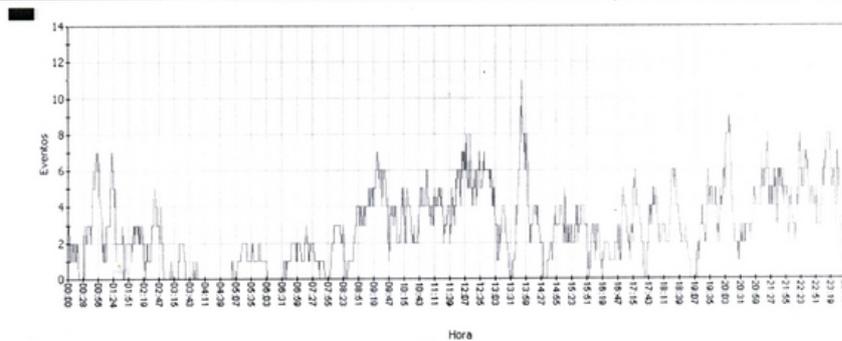
NOME ELEMENTO: SBCW.CW14

INTERVALO SELECIONADO: >= 00:00 e < 00:00

TOTAL DE ELEMENTOS: 333

PERÍODO: 15 Min

OPERAÇÃO: DEP + ARR



Legenda:

■ INTERVALO SELECIONADO

Sub-Página 1 de 1

Figura C.14: Gráfico obtido do CGNA

Apêndice D

Medidas tomada pelo CGNA

D.1 Relatório de medidas tomadas pelo CGNA.

REGISTRO DE MEDIDAS RESTRITIVAS – 072 / 2008	
DATA : 30/04/2008	
REGIÃO : RJ	
TURNO : 0630/1330P	Nº DE POSIÇÕES: 03 (RJ)
CAUSAS: – Excesso de tráfego na TMA-RJ e S14 em virtude de condições meteorológicas adversas em SBGL e SBRJ.	
TÉCNICAS EMPREGADAS (X) ÓRBITAS () ESPERA NO SOLO () ROTAS ALTERNATIVAS (X) REDUÇÃO DE VELOCIDADE EM ROTA () RESTRIÇÃO POR TEMPO (X) SEPARAÇÃO LONGITUDINAL	
OUTROS: Aeronave que efetuaram esperas na Região RJ: FAB6002 SBNT/SBGL 1245/1318UTC; TAM3419 SBBE/SBGL 1251/1318UTC; TIE5580 SBRP/SBRJ 1304/1314UTC; GLO1605 SBSV/SBGL 1300/1317UTC; ONE6311 SBRF/SBGR 1313/1318UTC	
PROCEDIMENTOS: 1216 / 1259Z – Separação de 30NM para entrada no setor S14 1259/1325Z - Suspensas as aproximações para o setor S14. 1325/ - Suspensas as aproximações para SBGL/SBRJ.	
SOLICITADO POR:	ACC CW
ATENDIDO:	ACC BS (RJ)
SUPERVISORES:	TEN LANZENDORF/TEN SERGIO
SUPERVISOR DE EQUIPE :	CTA CHAGAS
CHEFE DE EQUIPE :	Cap. C. SOARES
SUPERIOR DE DIA:	NIL

Figura D.1: Relatório obtido do CGNA

REGISTRO DE MEDIDAS RESTRITIVAS – 073 / 2008	
DATA : 30/04/2008	
REGIÃO : SP	
TURNO : 1330/2230P	Nº DE POSIÇÕES: 03 (SP)
CAUSAS:	
- Excesso de tráfego na final de SBSP.	
TÉCNICAS EMPREGADAS	
<input type="checkbox"/> ÓRBITAS <input type="checkbox"/> ESPERA NO SOLO <input type="checkbox"/> ROTAS ALTERNATIVAS <input type="checkbox"/> REDUÇÃO DE VELOCIDADE EM ROTA <input type="checkbox"/> RESTRIÇÃO POR TEMPO <input checked="" type="checkbox"/> SEPARAÇÃO LONGITUDINAL	
OUTROS:	
PROCEDIMENTOS:	
1950 / 0130Z – Tráfegos dos setores S02, S03 e S04 para SBSP, separação de 30NM.	
SOLICITADO POR:	APP-SP (SP)
ATENDIDO:	ACC- SP
SUPERVISORES:	TEN ROBERTO / 2S LEÃO
SUPERVISOR DE EQUIPE :	SO ALCANTARA
CHEFE DE EQUIPE :	CAP C. SOARES
SUPERIOR DE DIA:	NIL

Figura D.2: Relatório obtido do CGNA

REGISTRO DE MEDIDAS RESTRITIVAS – 074 / 2008	
DATA : 30/04/2008	
REGIÃO : RJ	
TURNO : 1330/2230P	Nº DE POSIÇÕES: 03 (RJ)
CAUSAS:	
– Excesso de tráfego nos setores S13 e S14 do ACC-CW, devido condições meteorológicas adversas na TMA-RJ..	
TÉCNICAS EMPREGADAS	
<input checked="" type="checkbox"/> ORBITAS	
<input checked="" type="checkbox"/> ESPERA NO SOLO	
<input type="checkbox"/> ROTAS ALTERNATIVAS	
<input checked="" type="checkbox"/> REDUÇÃO DE VELOCIDADE EM ROTA	
<input checked="" type="checkbox"/> RESTRIÇÃO POR TEMPO	
<input checked="" type="checkbox"/> SEPARAÇÃO LONGITUDINAL	
OUTROS:	
Aeronave que efetuaram esperas no setor S12 da Região RJ: GLO1785 SBSV/SBGL 2031/2051Z, TAM3307 SBNT/SBGL 2043/2100Z, IBE6027 LEMD/SBGL 2046/2053Z.	
Aeronave que efetuaram esperas no setor S11 da Região RJ: GEIV50 SBBR/SBRJ 2050/2112Z, GLO1693 SBBR/SBGL 2051/2109Z, , VRN2205 SBBR/SBGL 2234/2241Z.	
PROCEDIMENTOS:	
2020 / 2112Z - Esperas nos setores S11 e S12.	
2050 / 2113Z - Suspensas as decolagens da TMA-BR para a TMA-RJ. (CGNA)	
2113 / 2145Z - Decolagens da TMA-BR para a TMA-RJ, separação de 15 minutos. (CGNA)	
2137 / 2208Z - Tráfegos dos setores S10, S11 e S12 para o ACC-CW, separação de 30NM.	
2145 / 2208Z - Decolagens da TMA-BR para a TMA-RJ, separação de 5 minutos. (CGNA)	
2208 / 2232Z - Suspensas as decolagens da TMA-BR para a TMA-RJ. (CGNA)	
2232 / 2310Z - Decolagens da TMA-BR para a TMA-RJ, separação de 5 minutos. (CGNA)	
2234 / 2241Z - Espera no setor S11.	
SOLICITADO POR:	ACC- CW / CGNA
ATENDIDO:	ACC-BS (RJ) e TWR-BR
SUPERVISORES:	TEN BRANCO / 2S R/R DÉCIO (RJ)
SUPERVISOR DE EQUIPE :	SO ALCANTARA
CHEFE DE EQUIPE :	CAP C. SOARES
SUPERIOR DE DIA:	NIL

Figura D.3: Relatório obtido do CGNA