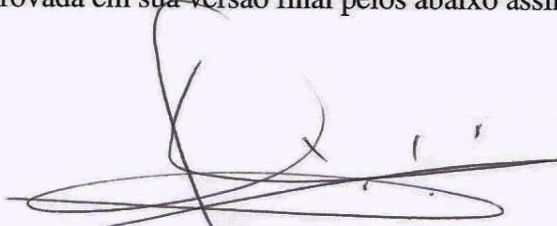


Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Transporte Aéreo e Aeroportos.

Alexandre Luiz Dutra Bastos

**UMA APLICAÇÃO DO CONCEITO DE
NAVEGAÇÃO BASEADA EM PERFORMANCE:
ANÁLISE DAS ROTAS ATS DE SALVADOR.**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Cláudio Jorge Pinto Alves
Orientador

Prof. Dr. Celso Massaki Hirata
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil.
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Bastos, Alexandre Luiz Dutra

Uma aplicação do conceito de Navegação Baseada em Performance: análise das rotas ATS de Salvador / Alexandre Luiz Dutra Bastos.

São José dos Campos, 2009.

147f.

Tese de mestrado – Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica, Área de Transporte Aéreo e Aeroportos – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009. Orientador: Cláudio Jorge Pinto Alves.

1. Navegação aérea. 2. PBN. 3. RNAV. 4. RNP. 5. Complexidade. 6. Espaço aéreo. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil. II. Uma aplicação do conceito de Navegação Baseada em Performance: análise das rotas ATS de Salvador.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BASTOS, Alexandre Luiz Dutra. **Uma aplicação do conceito de Navegação Baseada em Performance: análise das rotas ATS de Salvador**. 2009. 147f. Tese de mestrado em Transporte Aéreo e Aeroportos – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Alexandre Luiz Dutra Bastos

TÍTULO DO TRABALHO: Uma aplicação do conceito de Navegação Baseada em Performance: análise das rotas ATS de Salvador

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2009

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Alexandre Luiz Dutra Bastos
Rua H9-B, 403, Campus do CTA
12.228-611 – São José dos Campos - SP

**UMA APLICAÇÃO DO CONCEITO DE
NAVEGAÇÃO BASEADA EM PERFORMANCE:
ANÁLISE DAS ROTAS ATS DE SALVADOR.**

Alexandre Luiz Dutra Bastos

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Müller..... Presidente – ITA
Prof. Dr. Cláudio Jorge Pinto Alves..... Orientador – ITA
Prof. Dr. Alessandro Vinicius Marques Oliveira.. ITA
Prof. Dr. Paulo Sérgio Cugnasca..... EPUSP

ITA

DEDICATÓRIA

*À minha esposa,
à minha filha e
aos meus pais e irmãos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus. Por suas bênçãos que foram a Água Viva nesta minha jornada e o caminho seguro e sereno, que me permitiu prosseguir sem medo de errar.

À minha esposa Karênia, por todo o incentivo nos momentos de dúvida e pelos momentos ao meu lado nas alegrias e na angústia. Por suas palavras certas nos momentos incertos. Por sua enorme ajuda com o idioma estrangeiro. Por ser quem você é.

À minha filha Bárbara, pelos momentos em que soube entender cada ausência, e aos meus pais e irmãos por toda minha formação moral e acadêmica, incentivos e por cada oração e bênçãos importantes nos momentos mais difíceis.

Ao amigo Baum, por cada momento compartilhado nesta Pós-Graduação, principalmente nos momentos de incertezas, onde suas palavras foram a motivação de “nunca desistir”. Pela sua forma de amizade e doação sem medir esforços, seus conselhos e sua ajuda “matemática”.

Aos amigos Pogianelo e McWilliam, que abriram caminho para a Pós-Graduação de Oficiais de Tráfego Aéreo no ITA, pelos conselhos e todo suporte durante este caminho percorrido.

Ao meu orientador, Professor Cláudio Jorge por sua forma íntegra, serena e alegre na condução de uma orientação. Por todas as horas em que sempre esteve disponível para um conselho de mestre e de amigo.

Ao professor Carlos Müller por todas as observações e orientações claras e serenas. Por todo profissionalismo apresentado e por toda confiança depositada para que o sonho se realizasse no ITA, durante e após o período de Pós-graduação.

Aos professores Anderson e Alessandro por todo conhecimento repassado e incentivo para que eu pudesse persistir no caminho da pesquisa e no anseio por uma maior difusão dos

conhecimentos de tráfego aéreo. Aos demais professores e funcionários da Divisão de Engenharia Civil do ITA, por todo suporte e orientações.

Ao professor Paulo Cugnasca da USP, que prontamente aceitou o convite para a composição da Banca como membro externo. Suas observações sempre pautadas em muito respeito e serenidade foram muito importantes para o fechamento deste estudo.

Ao Coronel Aviador Candez, ex-comandante do CINDACTA III, por toda sua confiança depositada, e que, mesmo nos períodos de crise no tráfego aéreo, não mediu esforços para que este estudo se concretizasse.

Aos amigos e Chefes da Divisão Operacional do CINDACTA III, Coronel Wagner, Coronel William e Capitão Ernane, pelos conselhos, incentivos e esforços em busca desta realização.

Aos amigos e especialistas em procedimentos de navegação aérea, pelos debates, troca de informações, conselhos e orientações.

Aos amigos e controladores de tráfego aéreo do DTCEA-SV e do CINDACTA III pela ajuda necessária para a concretização deste estudo através da disponibilidade dos dados e pelos conselhos e orientações nas fases de concepção de rotas e simulação. *“Ad Astra Et Ultra!”*

Aos amigos de Pós-Graduação, por toda ajuda e desenvolvimento de trabalhos realizados ao longo desta jornada.

*“Hoje me sinto mais forte, mais feliz quem sabe,
Só levo a certeza de que muito pouco eu sei,
Eu nada sei.(...)
(...) Cada um de nós compõe a sua história,
Cada ser em si carrega o dom de ser capaz,
De ser feliz.”(Almir Sater)*

A todos a minha sincera gratidão.

*“A possibilidade de arriscar é que nos faz homens.
Vôo perfeito no espaço que criamos.
Ninguém decide sobre os passos que evitamos.
Certeza de que não somos pássaros e que voamos.
Tristeza de que não vamos por medo dos caminhos...”*
(Todo Risco – Damário Dacruz)

RESUMO

O aumento do tráfego aéreo nos grandes aeroportos brasileiros, aliado a uma configuração de rede de rotas estabelecida por auxílios à navegação aérea convencionais baseados no solo (VOR, DME, NDB), tem gerado constantes congestionamentos nas áreas de controle terminal e respectivas regiões circunvizinhas. A fim de dirimir estas questões, a ICAO instituiu o conceito de Navegação Baseada em Performance (PBN), objetivando aumentar a capacidade do espaço aéreo e diminuir os custos operacionais. Baseado neste conceito, este trabalho visa analisar as rotas ATS de Salvador de acordo com a futura expansão do seu aeroporto internacional, prevista em plano diretor e na qual é considerada a implantação de pistas paralelas. Os efeitos no tráfego aéreo de Salvador são aqui analisados confrontando três cenários modelados: (a) a configuração atual da rede de rotas considerando as pistas convergentes existentes nesse aeroporto; (b) a configuração atual de pistas com uma estrutura de rotas PBN e (c) uma estrutura de rotas PBN numa possível configuração de pistas paralelas. Neste contexto são adotadas métricas de tempo e distância de vôo, resolução de conflito, tempo de atraso nas decolagens e complexidade do espaço aéreo. O RAMS PLUS é utilizado como ferramenta de simulação computacional *fast-time* para esta análise de espaço aéreo.

O uso do RAMS PLUS e ATM *Analyser* neste estudo está de acordo com os Termos de Licença Acadêmica concedida ao ITA pela ISA Software Ltda.

Palavras-Chave: Navegação Aérea, PBN, RNAV, RNP, Complexidade, Espaço Aéreo.

ABSTRACT

The air traffic increasing in the largest Brazilian airports, combined with a configuration of routes established by conventional ground-based navigation aids (VOR, DME, NDB), have generated constant overcrowding in the terminal areas and respective surroundings. In order to solve these issues, ICAO has designed the concept of Performance-Based Navigation (PBN), which targets the increasing of air space capacity and operational costs reduction. Based on this concept, this work aims to analyze Salvador ATS routes according to the future expansion of its international airport, settled on director plan and in which it's considered the implantation of parallel runways. The effects on the air traffic of Salvador are analyzed by the confrontation of three scenery modeling: (a) the actual route configuration, considering the existing converging runways; (b) the actual runway configuration with a PBN routes structure and (c) a PBN routes structure on a possible configuration of parallel runways. In this context, metrics of flight time and distance, conflict resolution, departure delay and air space complexity are adopted. RAM PLUS is used as a computational simulation fast-time tool for this air space analysis.

RAMS PLUS and ATM Analyser utilization in this study is in accordance with the Academic Software License Agreement granted by ISA Software Ltd. to ITA.

Keywords: Air Navigation, PBN, RNAV, RNP, Complexity, Air Space.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Movimento do tráfego aéreo no Aeroporto Internacional de Salvador	20
Figura 1.2 – Movimento de passageiros (milhões) nos principais aeroportos brasileiros	21
Figura 1.3 – Movimento de aeronaves nos principais aeroportos brasileiros	21
Figura 1.4 – Movimento de carga (milhões de ton.) nos principais aeroportos brasileiros	21
Figura 2.1 – Conceito de Navegação Baseada em Performance	32
Figura 2.2 – Trajetórias radar das aeronaves nas rotas de saída do Aeroporto Internacional de Atlanta – antes e depois da utilização de rotas RNAV/RNP.....	34
Figura 2.3 – Tipos de <i>waypoint</i>	35
Figura 2.4 – Diferença entre navegação convencional e navegação RNAV	36
Figura 2.5 – Otimização do espaço aéreo com a utilização de rotas RNAV e RNP	37
Figura 2.6 – Segmento espacial do sistema GPS	40
Figura 2.7 – Circulação aérea em TMA RNAV/RNP	43
Figura 2.8 – Versão simplificada do processo de modelagem	47
Figura 2.9 – Técnicas de ensaio, verificação e validação em simulação	49
Figura 3.1 – Divisão das regiões de informação de vôo brasileiras	53
Figura 3.2 – FIR Recife - setores do ACC-RE	55
Figura 3.3 – TMA Salvador - setores do APP-SV	60
Figura 3.4 – Aeroporto Internacional de Salvador	61
Figura 4.1 – Proporção do tipo de aviação no aeroporto de Salvador.....	73
Figura 4.2 – Evolução mensal do tráfego aéreo em Salvador	74
Figura 4.3 – Evolução horária do tráfego aéreo em Salvador (dias-pico/ 2005).....	75
Figura 4.4 – Cenário Atual – modelagem do espaço aéreo	82
Figura 4.5 – Cenário Atual – modelagem do lado aéreo do aeroporto.....	83
Figura 4.6 – Cenário Proposto 1 – modelagem das saídas e chegadas.....	86
Figura 4.7 – Cenário Proposto 2 – modelagem do lado aéreo.....	88
Figura 4.8 – Cenário Proposto 2 – modelagem das saídas e chegadas.....	89
Figura 5.1 – Tempo total de vôo	92
Figura 5.2 – Tempo de vôo - saída	93
Figura 5.3 – Tempo de vôo - chegadas	93
Figura 5.4 – Distância de vôo - total	94
Figura 5.5 – Distância de vôo – saídas	94

Figura 5.6 – Distância de vôo - chegadas.....	95
Figura 5.7 – Resolução de conflitos	96
Figura 5.8 – Complexidade do setor 4.....	100
Figura 5.9 – Complexidade do setor 5.....	101
Figura 5.10 – Complexidade Alimentador Norte	102
Figura 5.11 – Complexidade Alimentador Sul.....	102
Figura 5.12 – Complexidade Final	102
Figura 5.13 – Tempo de atraso para decolagem.....	104
Figura C.1 – Configuração atual de operacionalidade de pistas em Salvador	122
Figura C.2 –Pista 10/28 de Salvador – número de saídas	124
Figura D.1 – Aplicação do tipo de navegação em cada fase de vôo	127
Figura D.2 – Exemplo de uma aplicação de especificação RNAV e RNP para rotas ATS ..	128
Figura D.3 – Distância mínima entre <i>waypoints</i>	131
Figura D.4 – Configuração em “T”em procedimento RNAV	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Auxílios à navegação existentes nas principais TMA brasileiras.....	22
Tabela 1.2 – Comparativo de número de controladores de órgãos ATC	23
Tabela 2.1 – Relação de espaço aéreo e especificação de navegação	31
Tabela 2.2 – Aplicação da RNAV/RNP na América Latina	38
Tabela 3.1 – Configuração da TMA e CTR de Salvador	57
Tabela 5.1 – Quadro resumo dos resultados	105
Tabela D.1 - Tolerâncias do sistema e semi largura da área de proteção para rotas RNAV .	128
Tabela D.2 - Requisitos mínimos para cada segmento de rota GNSS.....	129
Tabela D.3 - Velocidades (TAS) empregadas nos cálculos de procedimentos	129
Tabela D.4 – Valor do <i>buffer</i> para rotas RNP	129
Tabela D.5 - Localização de <i>waypoints</i> - Cenários Propostos 1 e 2.....	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	Centro de Controle de Área <i>Area Control Center</i>
APP	Controle de Aproximação <i>Approach Control</i>
ATC	Controle de Tráfego Aéreo <i>Air Traffic Control</i>
ATM	Gerenciamento de Tráfego Aéreo <i>Air Traffic Management</i>
ATFM	Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo <i>Air Traffic Flow Management</i>
ATS	Serviço de Tráfego Aéreo <i>Air Traffic Service</i>
ATZ	Zona de Tráfego de Aeródromo <i>Aerodrome Traffic Zone</i>
CGNA	Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo
CNS	Comunicação, Navegação e Vigilância <i>Communication, Navigation and Surveillance</i>
CTA	Área de Controle <i>Control Area</i>
CTR	Zona de Controle <i>Control Zone</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DME	Equipamento Medidor de Distância <i>Distance Measurement Equipment</i>
DTCEA	Destacamento de Controle do Espaço Aéreo

EUROCONTROL	Organização Europeia para Segurança e Navegação Aérea <i>European Organization for the Safety of Air Navigation</i>
FAA	Administração Federal de Aviação <i>Federal Aviation Administration</i>
FIR	Região de Informação de Voo <i>Flight Information Region</i>
FL	Nível de Voo <i>Flight Level</i>
FTS	Simulação em Tempo Acelerado <i>Fast-Time Simulation</i>
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite <i>Global Navigation Satellite System</i>
IATA	Associação Internacional de Transporte Aéreo <i>International Air Transport Association</i>
ICAO	Organização de Aviação Civil Internacional <i>International Civil Aviation Organization</i>
IFR	Regras de Voo por Instrumentos <i>Instrument Flight Rules</i>
NASA	Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDB	Rádio Farol Não-Direcional <i>Non-Direction Radio Beacon</i>
NOTAM	Aviso aos Aeronavegantes <i>Notice to Airmen</i>
PBN	Navegação Baseada em Performance <i>Performance-Based Navigation</i>
REA	Rotas Especiais de Aeronaves.
REAST	Rotas Especiais de Aeronaves Sem Transponder
RNAV	Navegação de Área <i>Area Navigation</i>
RNP	Performance de Navegação Requerida <i>Required Navigation Performance</i>

RTS	Simulação em Tempo Real <i>Real-Time Simulation</i>
RVSM	Separação Vertical Mínima Reduzida <i>Reduced Vertical Separation Minimum</i>
TMA	Área de Controle Terminal <i>Terminal Control Area</i>
TWR	Torre de Controle de Aeródromo <i>Tower Control</i>
UTA	Área Superior de Controle <i>Upper Control Area</i>
VFR	Regras de Vôo Visual <i>Visual Flight Rules</i>
VOR	Radiofarol Omnidirecional em VHF <i>VHF Omnidirectional Radio Range</i>

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
EPÍGRAFE	VII
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
SUMÁRIO.....	XVI
1. INTRODUÇÃO	19
1.1 MOTIVAÇÃO.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	25
1.3 ESCOPO DO ESTUDO	25
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
2. REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1 NAVEGAÇÃO AÉREA	29
2.1.1 O CONCEITO PBN	31
2.1.1.a ROTAS RNAV	34
2.1.1.b ROTAS RNP.....	36
2.1.1.c O EMPREGO DE ROTAS PBN.....	37
2.1.2 SISTEMA GNSS	39
2.2 MODELAGEM DE CIRCULAÇÃO AÉREA EM TMA.....	42
2.3 O USO DE SIMULAÇÃO EM TRÁFEGO AÉREO	44
2.3.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO EM SIMULAÇÃO	46
2.3.2 A FERRAMENTA RAMS PLUS	49
3. ESTRUTURA DO ESPAÇO AÉREO DO ESTUDO DE CASO	52
3.1 A ÁREA DE CONTROLE DA FIR RECIFE	54
3.1.1 CONFIGURAÇÃO.....	54
3.1.2 O ACC-RE E SETORIZAÇÃO.....	55
3.2 A ÁREA DE CONTROLE TERMINAL DE SALVADOR.....	56
3.2.1 CONFIGURAÇÃO.....	57

3.2.2 APP-SV E SETORIZAÇÃO	59
3.3 O AEROPORTO INTERNACIONAL DE SALVADOR	60
3.3.1 PISTAS E CIRCUITO DE TRÁFEGO	61
3.3.2 A TWR-SV	62
3.3.3 O PROJETO DE AMPLIAÇÃO	63
4. METODOLOGIA.....	64
4.1 ETAPAS DE MODELAGEM PARA SIMULAÇÃO ATM	64
4.2 COLETA DE DADOS	70
4.3 MODELAGEM DOS CENÁRIOS	76
4.3.1 O USO DO RAMS PLUS.....	77
4.3.2 CENÁRIO ATUAL (CA).....	81
4.3.2.a VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	83
4.3.3 CENÁRIO PROPOSTO 1 (C1).....	85
4.3.3.a MODELAGEM DE ROTAS PBN PARA PISTAS CONVERGENTES..	86
4.3.3.b VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	87
4.3.4 CENÁRIO PROPOSTO 2 (C2).....	88
4.3.4.a MODELAGEM DE ROTAS PBN PARA PISTAS PARALELAS	89
4.3.4.b VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	90
5 ANÁLISE E RESULTADOS.....	91
5.1 TEMPO DE VÔO	91
5.2 DISTÂNCIA DE VÔO	93
5.3 RESOLUÇÃO DE CONFLITOS.....	95
5.4 COMPLEXIDADE DO ESPAÇO AÉREO	96
5.5 TEMPO DE ATRASO PARA DECOLAGEM	103
5.6 RESUMO DOS RESULTADOS	104
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
6.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	106
6.2 ANÁLISE DA FERRAMENTA RAMS.....	108
6.3 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES	110
6.4 CONCLUSÃO.....	111
REFERÊNCIAS	114
APÊNDICE	119
APÊNDICE A - FICHA DE VERIFICAÇÃO - MODELO CONCEITUAL.....	119
APÊNDICE B - FICHA DE VERIFICAÇÃO - MODELO OPERACIONAL	120

APÊNDICE C - CÁLCULO DE CAPACIDADE DE PISTA DO AEROPORTO DE SALVADOR.	121
APÊNDICE D - CRITÉRIOS DE ELABORAÇÃO DE ROTAS PBN	127
ANEXOS	135
ANEXO I - PROJETO DE AMPLIAÇÃO DO AEROPORTO DE SALVADOR	135
ANEXO II - ÁREA DE CONTROLE TERMINAL DE SALVADOR.....	136
ANEXO III - ROTAS ESPACIAIS DE AERONAVES EM VÔO VISUAL.....	137
ANEXO IV - PROCEDIMENTOS DE NAVEGAÇÃO AÉREA DA TMA-SV.....	138
ANEXO V - SÍTIO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SALVADOR	139
ANEXO VI - CIRCUITO DE TRÁFEGO DE SALVADOR.....	140
ANEXO VII - DADOS COLETADOS DO SGTC ENTRE JAN/2003 E SET/2006....	141
ANEXO VIII - HORAS DE SIMULAÇÃO	142
ANEXO IX - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	143
ANEXO X - DADOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO (CD)	147

1. INTRODUÇÃO

O transporte por modal aéreo, até a mais recente crise econômica, foi um segmento em rápida expansão em virtude do então crescimento da economia mundial. Entretanto, a crise neste setor no Brasil, deflagrada em 2006 e denominada “Apagão Aéreo”, reflete um momento particular da relação sociedade e transporte aéreo, com o envolvimento de órgãos governamentais, comunidade científica e administração aeroportuária, dentre outros.

Nos últimos anos, o tráfego aéreo apresentou crescimento acelerado no número de aeronaves, resultando num cenário de aeroportos congestionados situados próximos aos grandes centros urbanos e, conseqüentemente, o congestionamento do espaço aéreo, principalmente nas áreas de controle terminal e regiões circunvizinhas.

Aliado ao crescimento do tráfego aéreo, a crise brasileira do “apagão aéreo” apresentou uma carência de recursos humanos nos serviços de tráfego aéreo e de infra-estrutura instalada, tanto aeroportuária, como na rede de rotas de navegação. As conseqüências de tal espaço aéreo congestionado estão, ao final, associadas a diminuição da qualidade de serviço, incluindo atrasos e seus altos custos operacionais.

O espaço aéreo congestionado, portanto, tornou-se um fator limitante de capacidade. Segundo a ICAO [1], uma das possibilidades de melhorar a eficiência, segurança e fluidez do tráfego aéreo e, conseqüentemente, gerar o aumento de capacidade, é a adoção da Navegação Baseada em Performance (PBN) nos procedimentos de navegação aérea.

Assim, o avanço tecnológico da aviação demanda uma urgente reestruturação na elaboração de procedimentos de navegação aérea, a fim de que os novos equipamentos, aviônicos e

técnicas de navegação sejam explorados de maneira condizente com suas potencialidades, acompanhando a evolução do transporte aéreo.

1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente demanda do tráfego aéreo, aliada a inúmeros congestionamentos, é observada nos grandes aeroportos do Brasil e, inserido neste contexto, está o Aeroporto Internacional de Salvador - Deputado Luís Eduardo Magalhães que cresce, em média, 14% ao ano e responde por mais de 30% da movimentação de passageiros do Nordeste, com uma média diária de mais de dez mil passageiros, 250 pousos e decolagens, 100 vôos domésticos e 16 internacionais, INFRAERO [2] (Figura 1.1). Como principal aeródromo público dentro da TMA-SV, sua atividade garante a quarta posição entre as TMA mais movimentadas do país.

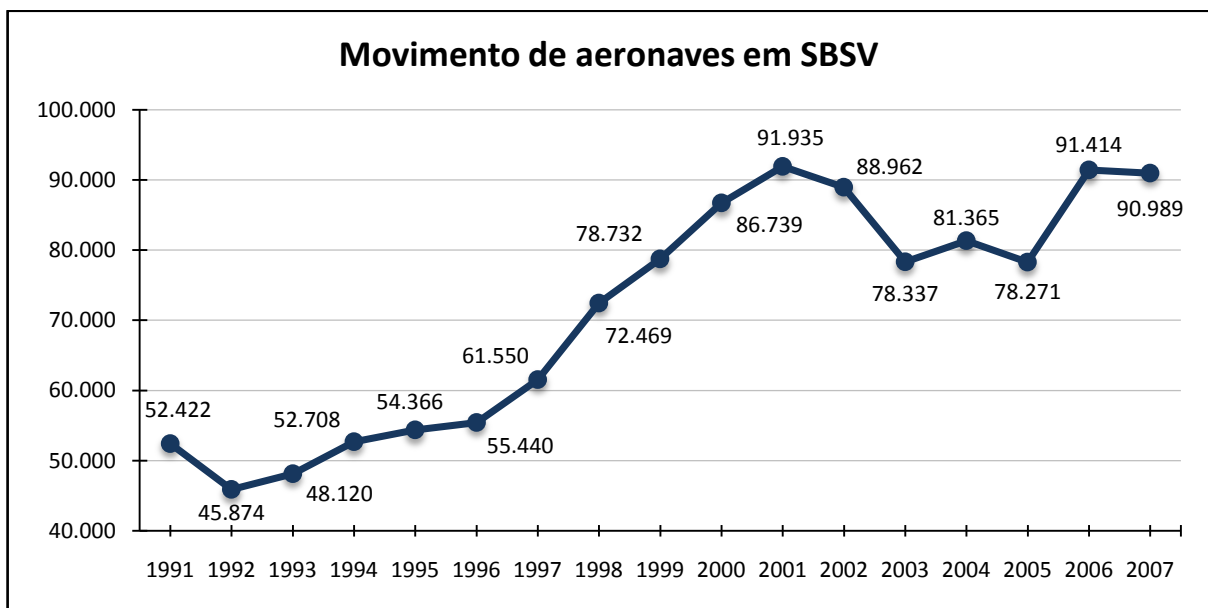


Figura 1.1 – Movimento do tráfego aéreo no Aeroporto Internacional de Salvador.
Fonte: INFRAERO [1].

Nos últimos anos, o aeroporto da capital baiana destaca-se não apenas entre os aeroportos brasileiros de maior movimento de aeronaves, mas também entre os maiores de movimento de

passageiros e de carga (Figuras 1.2 a 1.4). Entretanto, a capacidade do lado aéreo do aeroporto não foi alterada em proporção às altas taxas de crescimento no tráfego aéreo.

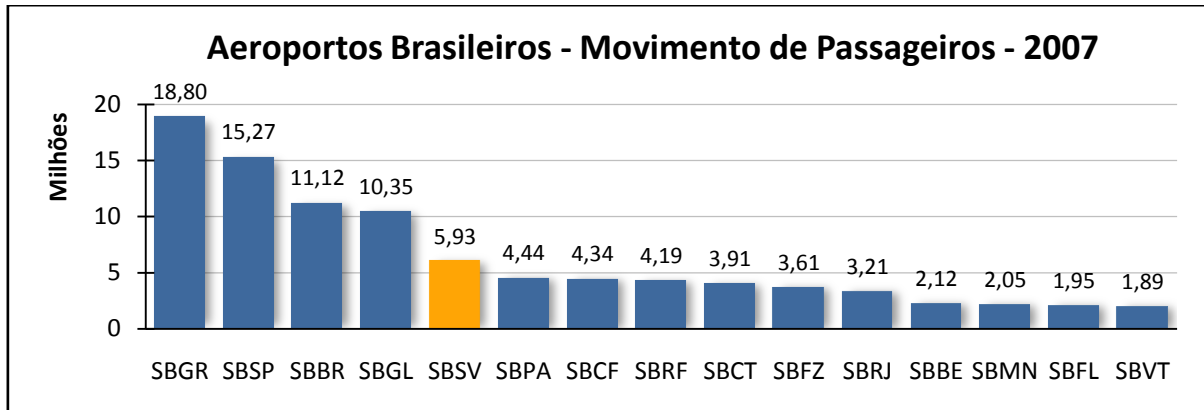


Figura 1.2 – Movimento de passageiros (milhões) nos principais aeroportos brasileiros.
Fonte: INFRAERO [2].

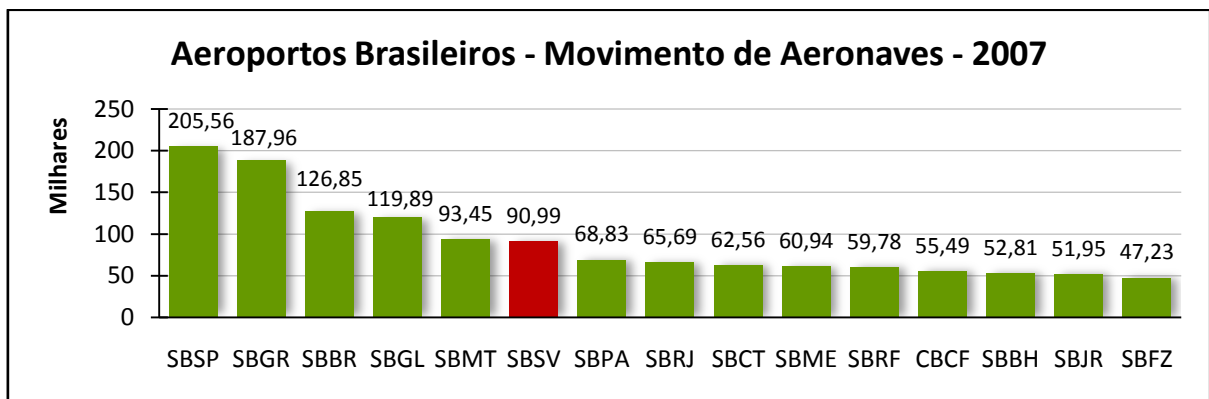


Figura 1.3 – Movimento de aeronaves nos principais aeroportos brasileiros.
Fonte: INFRAERO [2].

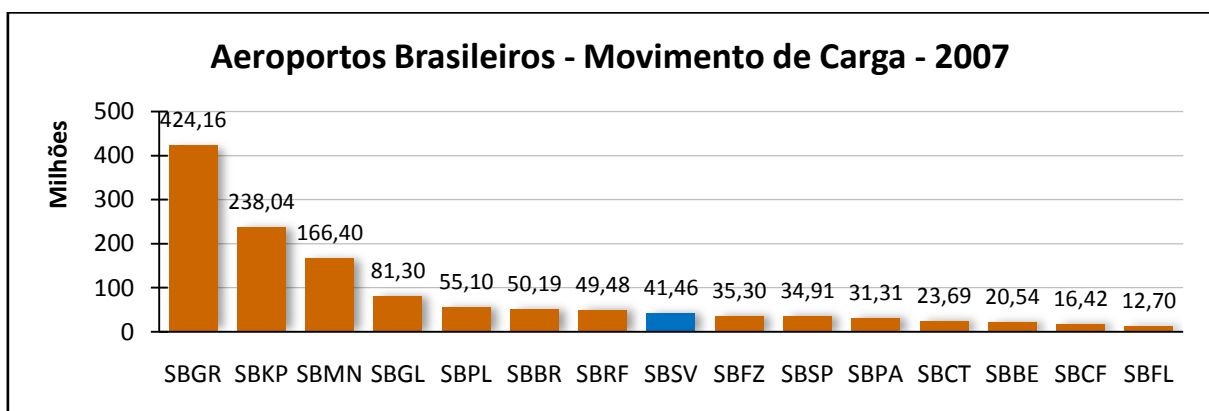


Figura 1.4 – Movimento de carga (milhões de ton) nos principais aeroportos brasileiros.
Fonte: INFRAERO [2].

A TMA-SV apresenta uma rede de rotas que ainda está baseada em auxílios à navegação no solo (VOR, NDB, DME) ¹. Tais auxílios estão associados a uma série de desvantagens operacionais tais como: custos de manutenção elevados, baixa precisão de navegação (obsoletas para os novos aviônicos) e dificuldades de novas implantações. Este cenário impõe restrições à capacidade aeroportuária e contribui para a geração de grandes atrasos no referido aeroporto.

Além das dificuldades encontradas inerentes aos auxílios à navegação, outro fator primordial na elaboração de procedimentos de navegação aérea, baseados em equipamentos instalados no solo, diz respeito à quantidade necessária para estabelecer guia positivo de curso².

Em comparação com outras áreas de controle terminal de grande movimento (Tabela 1.1), a TMA-SV, apesar de estar na quarta posição de maior movimento no país, não apresenta recursos necessários de equipamentos no solo para estabelecer rotas mais eficazes e capazes de proporcionar menores custos e maiores capacidade de controle.

Tabela 1.1 – Auxílios à navegação existentes nas principais TMA brasileiras.

AUXÍLIOS À NAVEGAÇÃO				
TMA	NDB	VOR/DME	ILS	TOTAL
SP	15 + (4) ³	7 + (1)	5	32
RJ	11 + (3)	6 + (1)	4	25
BR	4 + (1)	3 + (1)	2	11
CT	6 + (2)	1 + (1)	1	11
BH	5	2	1	8
SV	3 + (1)	1	1	6

Fonte: DECEA [3].

¹ Equipamentos localizados no solo que determinam a posição de uma aeronave e a orienta a um ponto desejado. São utilizados em todas as fases do voo. VOR (Radiofarol Omnidirecional em VHF) e NDB (Rádio Farol Não-Direcional) fornecem o azimuth e o DME (Equipamento Medidor de Distância) fornece a distância.

² Guia positivo de curso refere-se à capacidade da aeronave manter uma rota, orientando-se pela recepção de informações eletromagnéticas de equipamentos situados no solo. O equipamento de solo sintonizado estará sempre à frente ou à cauda da aeronave, e o voo é estabelecido com o sobrevoo destes auxílios.

³ Os números entre parênteses informam os auxílios à navegação que estão fora dos limites laterais da TMA, distantes até 30NM deste limite, e que podem ser utilizados na elaboração de rotas de chegada (STAR) e de saída (SID) das TMA.

A capacidade de controle ainda pode ser seriamente reduzida em função do número N^4 estabelecido para cada espaço aéreo. Tal elemento de restrição está diretamente ligado aos recursos humanos dentro de um órgão de controle.

Os últimos estudos apontam para um déficit de controladores de tráfego aéreo na maioria dos órgãos ATC brasileiros e que somente poderá ser resolvido a médio e longo prazo, devido à dificuldade de formação de mão-de-obra especializada, DECEA [4]. Nesta estrutura de carência de controladores, os órgãos ATC de Salvador apresentam índices ainda mais baixos que as demais localidades de grande movimento (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 – Comparativo de número de controladores de órgãos ATC.

EFETIVO OPERACIONAL		
ÓRGÃO	LOCAL	QUANTIDADE
TWR	GL	62
	GR	57
	SP	55
	BR	49
	CT	38
	CF	32
	SV	25
APP	RJ	134
	SP	120
	BR	42
	CT	40
	BH	39
	SV	27

Fonte: DECEA [4].

Outro importante fator para este estudo é que, desde 2006, o Brasil firmou um compromisso junto a ICAO [5], o qual faz parte de uma estratégia de evolução da navegação aérea para a implementação dentro das Regiões CAR/SAM⁵, para curto prazo (2006-2010) e médio prazo (2011-2015).

Esta estratégia está baseada nos conceitos RNAV e RNP, que são a base da PBN, e que deverão ser aplicados nas operações das aeronaves, envolvendo procedimentos de

⁴ Número N é o número máximo de aeronaves que podem ser controladas simultaneamente em um mesmo setor do espaço aéreo designado.

⁵ Região CAR/SAM é a região do globo, dividida e designada pela ICAO, para representar a porção referente às Regiões do Caribe e América do Sul, respectivamente.

aproximação, saída, chegada e em rota. Até 2010 deverão ser implantados procedimentos RNAV/RNP em TMA e em todos os aeroportos internacionais. Entretanto, até 2008, apenas algumas rotas RNAV foram implantadas em território brasileiro.

Por outro lado, grande parte da frota regular atuante no país, doméstica e internacional, já é dotada de requisitos de aviônicos e tripulação, homologados para navegação baseada em performance e ainda não utilizam este tipo de navegação devido à estrutura atual de rotas.

Concomitantemente a esta situação, a imagem do país perante a comunidade internacional foi fortemente questionada durante o período de crise existente devido às falhas de infra-estrutura que dão suporte ao controle de tráfego aéreo (equipamentos e recursos humanos).

Paralelamente a estes fatores que incitam este trabalho, há a revisão do plano diretor aeroportuário feitos pela INFRAERO em 2001. Um dos aspectos abordados, além da ampliação do lado terrestre (ampliação do pátio e do terminal de passageiros (TPS) com mais três módulos e remodelamento do acesso viário ao aeroporto), foi a remodelação da configuração das pistas existentes para o conceito de pistas paralelas, visto que a atual configuração das pistas de rotas convergentes remonta à época da Segunda Grande Guerra.

O projeto apresentado pela INFRAERO [6] no ano de 2002 (Anexo I) implica diretamente nos procedimentos de navegação aérea de saída e aproximação, entretanto, estudos de comportamento do tráfego aéreo e reestruturação de rotas na terminal ainda não foram desenvolvidos.

Assim, diante de um cenário de recursos escassos e que somente podem ser resolvidos a médio e longo prazos, a inserção de novas tecnologias de elaboração de procedimentos de navegação aérea baseada em performance adotadas pela ICAO, e ainda não aplicadas no Brasil, é uma diretriz de custo baixo de implantação e de manutenção que pode ser

implementada a curto prazo, adequando-se às fases de ampliação do Aeroporto Internacional de Salvador.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é analisar o comportamento do tráfego aéreo na rede de rotas da Terminal de Salvador (TMA-SV), adotando o conceito de Navegação Baseada em Performance (PBN) para todas as rotas ATS⁶ IFR que partem e chegam de Salvador, bem como reestruturar as rotas VFR, dispostas em corredores visuais ao longo do litoral.

Como objetivos secundários, direcionados ao estudo de tráfego aéreo tem-se:

- a) Analisar no cenário brasileiro o conceito de estruturação da circulação aérea em Área Terminal com rotas PBN;
- b) Analisar a fluidez do tráfego aéreo na TMA-SV com a implantação de pistas paralelas no Aeroporto Internacional de Salvador;
- a) Estabelecer etapas de modelagem de simulação *fast-time* aplicadas ao gerenciamento de tráfego aéreo (ATM).

1.3 ESCOPO DO ESTUDO

Inicialmente, este estudo objetivava a estruturação das rotas ATS da TMA-SV. Entretanto, analisando a rede de rotas partindo e chegando de Salvador, pode-se perceber que aproximadamente 2/3 da distância voada em um procedimento STAR ou SID da localidade estava fora dos limites laterais/verticais da TMA.

⁶ Rota especificada, de acordo com a necessidade, para proporcionar serviços de tráfego aéreo. A expressão "rota ATS" se aplica, neste caso, aos procedimentos de navegação aérea.

A fim de representar maior realismo na configuração de rotas, bem como verificar o real ganho, em termos de tempo e distância voada, em uma possível implantação de rotas PBN, este estudo teve como escopo a modelagem de todas as rotas IFR e VFR de Salvador, desde o início da STAR até o pouso (para as aeronaves chegando) e da decolagem até o ingresso na aerovia (para as aeronaves partindo).

Assim, foi necessária a modelagem do espaço aéreo que continha estas rotas ATS, com a inserção de todas as áreas de controle da FIR-RE e TMA-SV e seus respectivos setores, limites e restrições e auxílios à navegação aérea.

Com o objetivo de analisar os ganhos com a implantação de pistas paralelas, além das rotas ATS, foram modelados os movimentos das aeronaves no solo desde a liberação da pista até os boxes (para as aeronaves chegando) e do *push-back* até a cabeceira de pista (para as aeronaves partindo).

Apesar de ter sido modelado todo lado aéreo do aeroporto, tais como: pistas, pistas de taxi, pátios e *gates*, este estudo focou apenas uma análise de solo, com o intuito de medir o comportamento dos atrasos na decolagem em uma possível implantação de pistas paralelas. Portanto, o tempo de *push-back* e de táxi não foram analisados nesta pesquisa.

Também foi analisada a estrutura do espaço aéreo por meio de métricas de número de resolução de conflitos e complexidade do espaço aéreo. Neste estudo, tais métricas visam medir a eficiência e o comportamento das aeronaves nas rotas ATS. A carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo não faz parte do escopo desta pesquisa.

Em relação ao comportamento do tráfego, foram modelados não apenas um dia típico, e sim uma seqüência de dias-pico (maior movimento de cada mês), capazes de absorver o

dinamismo do tráfego aéreo da localidade, contendo variações do mix e número de aeronaves, da origem/destino, da pista em uso, das rotas voadas e do tempo de entrada no sistema.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O Capítulo 2 apresenta três alicerces para o desenvolvimento deste estudo. Primeiramente, a conceituação de Navegação Baseada em Performance, descrevendo sua composição, vantagens e implantações desenvolvidas. Em seguida, descreve o conceito de circulação em TMA e suas características. Por último, faz uma breve introdução da simulação em ATM e o uso da ferramenta RAMS PLUS 5.0.

O Capítulo 3 discorre sobre a estrutura do espaço aéreo na Região Nordeste do Brasil. Apresenta ao leitor as principais características das áreas de controle, órgãos prestadores de serviço de tráfego aéreo e particularidades dos procedimentos utilizados.

O Capítulo 4 mostra a metodologia utilizada. Primeiramente, expõe a proposta de etapas de modelagem de simulação ATM. Em seguida, apresenta a coleta e análise dos dados e detalha a modelagem dos três cenários, com suas características relacionadas à configuração de pistas e tipo de navegação utilizada, bem como a modelagem dos cenários utilizando a ferramenta RAMS PLUS.

No Capítulo 5 são analisados os resultados comparativos entre os três cenários por meio das cinco métricas utilizadas: tempo e distância de vôo, complexidade do espaço aéreo, resolução de conflitos e atrasos para decolagem, apontando os cenários mais eficientes em cada uma destas métricas.

O Capítulo 6 aborda as limitações do estudo e faz uma análise da ferramenta RAMS PLUS, bem como apresenta sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

Por último, este trabalho apresenta quatro Apêndices e dez Anexos contendo informações que visam complementar o estudo. Os Apêndices retratam as fichas de verificação para simulação *fast-time* ATM e descrevem os cálculos para a elaboração das rotas PBN de Salvador e para a capacidade do Aeroporto de Salvador.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 NAVEGAÇÃO AÉREA

Segundo Monteiro [7], navegação aérea é a maneira de conduzir com habilidade e segurança, de um lugar para outro, um dirigível através do espaço, podendo, a qualquer momento, determinar o local onde se encontra. Para atingir este objetivo, são utilizados métodos de navegação, destacando-se como principais:

- a) Navegação Observada ou Praticagem – conhecida também por navegação visual, consiste em observar, na superfície terrestre, referências visuais identificáveis, tais como: rios, estradas, cidades, pontes ou outros pontos significativos do terreno, que possam servir de base de orientação na determinação da posição da aeronave;
- b) Navegação Estimada - neste método, a posição geográfica da aeronave é determinada considerando-se a direção e o tempo voado desde o ponto de partida. Para sua utilização, há necessidade do conhecimento prévio de alguns elementos essenciais tais como: coordenadas geográficas, distância e direção dos pontos de partida e destino, velocidade e tempo de vôo da aeronave e, direção e velocidade do vento;
- c) Navegação Rádio ou Radiogoniométrica - é o método em que se utilizam equipamentos rádios como NDB, VOR, DME, entre outros, para determinar a posição de uma aeronave e orientá-la a um ponto desejado;
- d) Navegação Astronômica ou Celestial - método de navegação mais antigo que se tem conhecimento, cuja posição é determinada em função dos astros;

- e) Navegação Inercial - método que não utiliza equipamento instalado no solo, visto que os computadores de bordo determinam a posição e orientação da aeronave baseadas em fenômenos físicos como a Lei da Inércia;
- f) Navegação Satelital - navegação baseada em constelação de satélites que são distribuídos em órbitas definidas ao redor da Terra, os quais fornecem posição e orientação a ser seguida.

Para esta pesquisa, os métodos de navegação listados de a) a d) serão denominados “convencionais”. A circulação aérea nas grandes TMA brasileiras ainda é baseada nestes métodos, principalmente a navegação rádio. Já os processos listados nos itens e) e f) serão a base para a navegação PBN e serão descritos em maior detalhe posteriormente.

Nas rotas de navegação convencionais, uma trajetória de vôo de uma aeronave se assemelha a uma linha do ziguezague que conecta os auxílios à navegação que ela sobrevoa em sua rota. Os cálculos da posição das aeronaves são baseados na recepção de ondas de rádio emitidas pelos auxílios à navegação baseados no solo, às quais os receptores de bordo estão sintonizados e cujas posições geográficas exatas são conhecidas e marcadas claramente em mapas aeronáuticos. A rede de rotas é formada com base nestes auxílios, freqüentemente posicionados em intersecções de duas ou mais rotas.

Segundo Milosavljević [8], “uma trajetória de vôo definida dessa maneira está longe do ótimo. Uma vez que a distância mais curta entre dois pontos é uma linha reta, qualquer outra trajetória que não seja uma linha reta exigiria mais tempo, combustível e outros custos, sem mencionar o espaço aéreo congestionado”.

2.1.1 O CONCEITO PBN

Desde 2003, o conceito de Navegação Baseada em Performance vem sendo adotado pela Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO) e pela Administração Federal de Aviação (FAA) de maneira a englobar conceitos de navegação que, de alguma forma, exigem parâmetros mínimos para operação em determinado espaço aéreo. Entretanto, os conceitos de Navegação de Área (RNAV) e Performance de Navegação Requerida (RNP), inseridos neste tipo de navegação, têm sido estudados desde os anos 80.

O crescimento contínuo do transporte aéreo aponta para a falta de capacidade do espaço aéreo e enfatiza a necessidade de utilização mais eficiente deste espaço aéreo disponível, ICAO [9]. O conceito CNS/ATM é definido pela ICAO como “Sistemas de Comunicação, Navegação e Vigilância, empregando tecnologia digital, inclusive sistema satelital associado a vários níveis de automação”. De acordo com Siqueira [10], “sua principal proposta é aumentar a capacidade do espaço aéreo e diminuir os custos operacionais, mantendo ou melhorando os níveis de segurança praticados atualmente”.

Em busca de uma melhor eficiência operacional, conceitos de navegação como RNAV, RNP e Redução da Separação Mínima Vertical (RVSM), contidos dentro do CNS/ATM, estão sendo amplamente utilizados e difundidos como elementos de gestão do espaço aéreo em todas as fases de voo. Estes novos conceitos foram desenvolvidos, avaliados e certificados, e os critérios de separação de espaço aéreo e de obstáculo foram desenvolvidos com base no desempenho disponível do equipamento a bordo das aeronaves.

As especificações de exigências foram baseadas nas potencialidades disponíveis de cada equipamento e, em algumas aplicações, foi necessário identificar cada modelo que poderia ser operado dentro do espaço aéreo específico. Tais exigências atrasavam a introdução de novas tendências do sistema de RNAV e elevavam os custos para manter a certificação apropriada.

Para evitar esta situação, a partir de 2003, a ICAO introduziu um método alternativo para definir os requisitos mínimos através de especificação de medidas de desempenho, denominando assim, a Navegação Baseada em Performance , ICAO [1].

Portanto, o conceito PBN é baseado na idéia em que as autoridades internacionais de aviação especifiquem padrões requeridos de performance para a operação em um determinado espaço aéreo, em uma determinada rota ou em um determinado procedimento, em vez de especificar os aviônicos requeridos ou outro equipamento necessário para um determinado nível de desempenho da navegação, Milosavljević [8].

O conceito PBN está compreendido por três componentes: Especificação de Navegação, Infra-Estrutura de Navegação e Aplicação de Navegação, ICAO [1] (Figura 2.1).

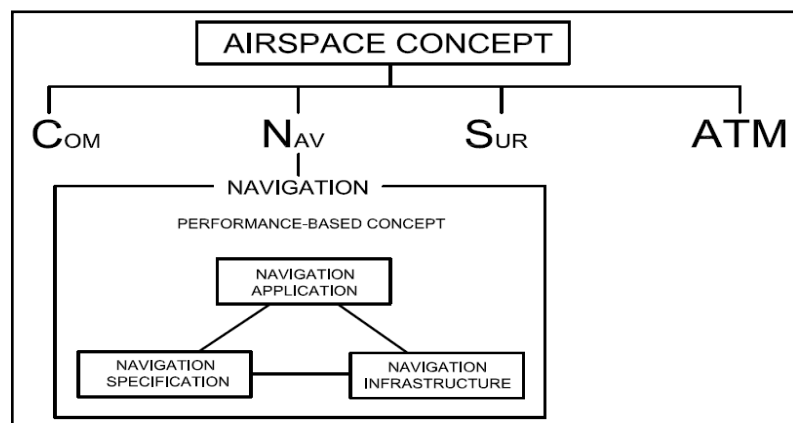


Figura 2.1 – Conceito de Navegação Baseada em Performance.
Fonte: ICAO [1].

- a) A Especificação de Navegação prescreve os requisitos de performance em termos de precisão, integridade, continuidade e disponibilidade para uma determinada operação em um particular espaço aéreo. Inclui não somente as especificações de RNAV e RNP, mas também especificações operacionais de treinamento de tripulações.

- b) A Infra-Estrutura de Navegação inclui todo tipo de auxílio à navegação (VOR, DME, GNSS) que possa ser utilizado, em um determinado espaço aéreo, pela navegação RNAV.
- c) A Aplicação de Navegação se refere à aplicação dos outros dois componentes dentro de um contexto de espaço ATS definido, tais como: procedimentos em rota, saída, chegada e aproximação (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Relação de espaço aéreo e especificação de navegação.

FASE DO VÔO	ESPECIFICAÇÃO DE NAVEGAÇÃO
Em rota (oceânica ou remota)	RNAV10, RNP4
Em rota (continental)	RNAV5, RNAV2, RNAV1
Chegada (star)	RNAV5, RNAV2, RNAV1, BASIC-RNP1
Aproximação inicial, intermediária e perdida	RNAV1, BASIC-RNP1, RNP APCH
Aproximação final	RNP APCH, RNP AR APCH
Saída	RNAV2, RNAV1, BASIC-RNP1

Fonte: ICAO [1].

Tais especificações de navegação têm por objetivo minimizar o impacto dos custos de implantação devido aos diferentes tipos de aeronaves e sistemas existentes no globo. Assim, cada país signatário da ICAO poderá estabelecer um planejamento de implantação da PBN de acordo com suas necessidades operacionais e técnicas.

Além de oferecer vantagens sobre o método baseado em sensor para critérios de separação de espaço aéreo e obstáculos, tais como redução de custos de desenvolvimento/implantação e tempo de aprovação de novas tecnologias, a PBN proporciona segundo a FAA [11]:

- a) Aumento da eficiência e capacidade do espaço aéreo proporcionado por uma menor separação entre as rotas e pela introdução de rotas paralelas *offset*⁷;
- b) Aumento da segurança com uma navegação mais acurada;

⁷ Rotas estabelecidas paralelamente, à esquerda ou à direita, de uma rota anteriormente planejada, com espaçamento previsto de acordo com as especificações requeridas e que visam aumentar a capacidade do espaço aéreo.

- c) Rotas mais diretas;
- d) Redução nas comunicações de voz e na carga de trabalho de pilotos e controladores;
- e) Economias de combustível e de tempo de utilização da aeronave alcançadas por menores tempos de espera no solo e em voo;
- f) Procedimentos mais flexíveis e mais favoráveis ao meio ambiente, proporcionando menores ruído e poluição do ar;
- g) Perfil de voo vertical aperfeiçoado com descida mais suave;
- h) Aumento da previsibilidade e repetibilidade da trajetória de voo (Figura 2.2).

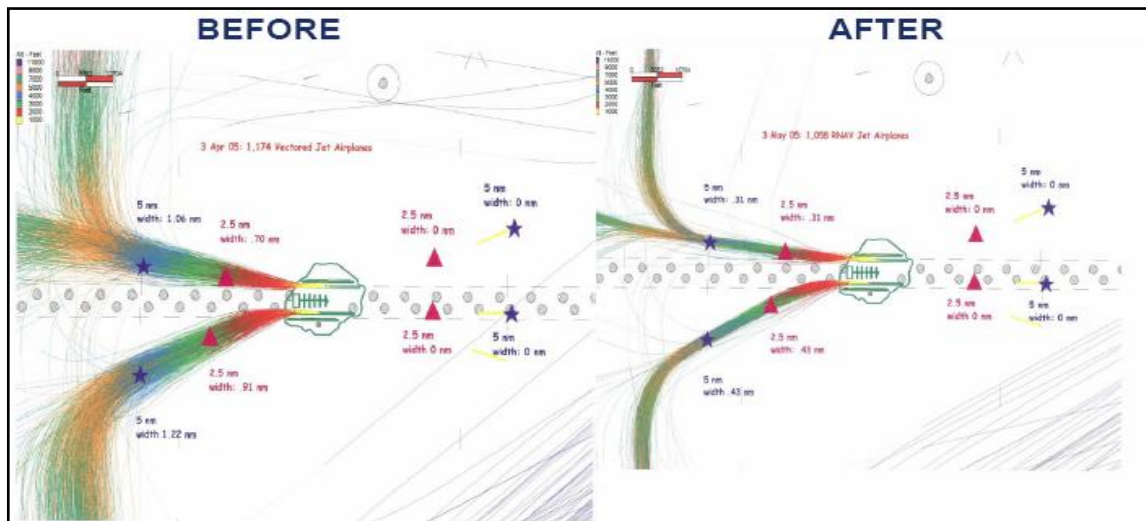


Figura 2.2 – Trajetórias radar das aeronaves nas rotas de saída do Aeroporto Internacional de Atlanta – antes e depois da utilização de rotas RNAV/RNP.

Fonte: FAA [11].

Em termos de especificação de navegação, é necessário fazer uma ressalva na distinção entre as navegações RNAV e RNP que compõem o conceito PBN.

2.1.1.a ROTAS RNAV

RNAV ou Navegação de Área é um método de navegação que permite a operação de aeronaves em qualquer trajetória de voo desejada, dentro da cobertura dos auxílios à

navegação ou dentro dos limites de capacidade de auxílios autônomos, ou de uma combinação de ambos.

Na RNAV não é mais necessário sobrevoar os auxílios à navegação ou fixos⁸, mas definir somente os *waypoints*⁹ posicionados dentro dos limites especificados.

São considerados dois tipos de *waypoints* (Figura 2.3):

- a) *Flyover*: *waypoint* em que se inicia uma curva para interceptar o próximo segmento de rota.
- b) *Fly-by*: *waypoint* que requer uma antecipação de curva para permitir uma interceptação tangencial no próximo segmento de rota.

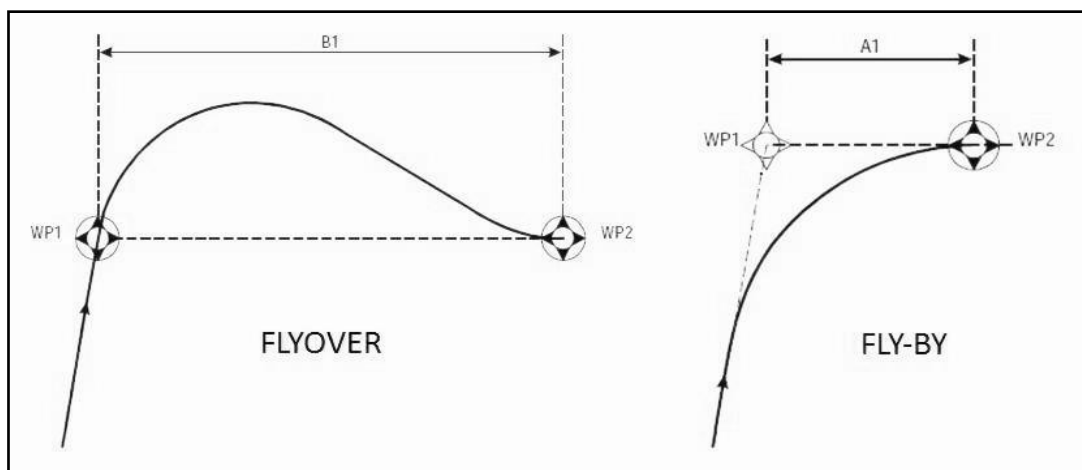


Figura 2.3 – Tipos de waypoint.

Fonte: ICAO [12].

Assim, o método RNAV permite uma maior flexibilidade para elaboração de procedimentos de navegação e, conseqüentemente, uma melhor utilização do espaço aéreo, com a redução da separação entre rotas e operações de voo ponto-a-ponto (maior fluxo de tráfego aéreo), e melhoria nos perfis de saída e chegada. (Figura 2.4). Tais benefícios propiciam significantes

⁸ Fixo é uma localização geográfica, definida por marcações eletromagnéticas emitidas por auxílios à navegação no solo, usados para definir rotas ATS.

⁹ *Waypoint* é uma localização geográfica especificada, definida por latitude/longitude, usada para definir uma rota RNAV.

vantagens ambientais, econômicas e operacionais para operadores de aeronaves e provedores de Serviços de Tráfego Aéreo, ICAO [1].

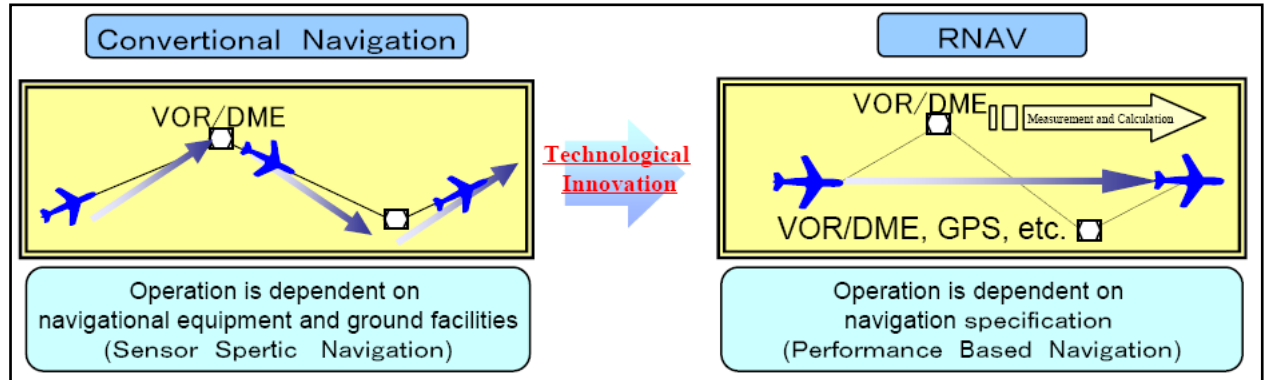


Figura 2.4 – Diferença entre navegação convencional e navegação RNAV.

Fonte: ICAO [1].

Sprong et al [13] e Barker et al [14] constataram, em ambos os estudos para a TMA de Las Vegas, os seguintes benefícios das rotas RNAV em relação as rotas convencionais:

- Redução do tempo e distância de vôo;
- Aumento da previsibilidade do tempo de desvios laterais na rota;
- Permanência das aeronaves, em altitudes e velocidades mais elevadas, por mais tempo;
- Melhor conformidade lateral com a rota;
- Aumento da regularidade do tempo entre chegadas (IAT).

2.1.1.b ROTAS RNP

A RNP é uma navegação RNAV com a adição de monitoramento de performance e alerta de capacidade de vôo a bordo. Uma definição característica de operação RNP é a capacidade do sistema de navegação da aeronave de monitorar e alertar os desvios laterais da aeronave, definindo assim, uma região de confinamento ao redor de cada trajetória e em cada fase do vôo, com o objetivo de alcançar maior precisão e segurança. (Figura 2.5).

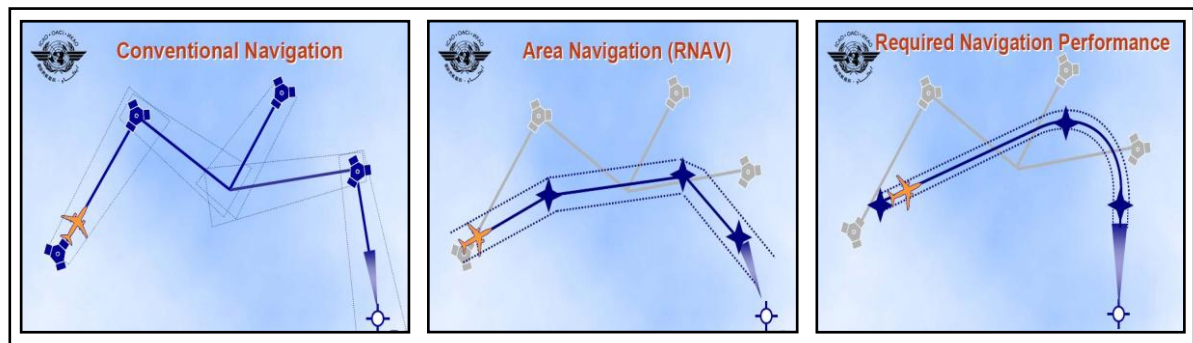


Figura 2.5 – Otimização do espaço aéreo com a utilização de rotas RNAV e RNP.

Fonte: ICAO [1].

É esperado que a aeronave esteja pelo menos 95% do tempo dentro desta região de confinamento mais estreita, à esquerda e à direita da linha central da trajetória. A área de tolerância total depende do nível de RNP aplicado e é igual a duas vezes o seu valor. Assim, uma rota RNP1 terá uma tolerância lateral de 1NM para cada lado do eixo da rota, ICAO [12].

2.1.1.c O EMPREGO DE ROTAS PBN

Sob a PBN, as exigências genéricas de navegação são definidas baseadas nos requisitos operacionais. Os operadores podem então avaliar as opções com respeito às tecnologias e serviços disponíveis de navegação que possam permitir que estas exigências sejam atendidas dentro de um custo eficaz, ao contrário de uma solução que esteja sendo imposta como parte das exigências operacionais, ICAO [1].

Pesquisas desenvolvidas nos EUA, principalmente pela FAA em parceria com a MITRE, das quais se destacam: Sprong et al [13] [15], Barker et al [14] e Mayer et al [16] [17], apresentam os benefícios para operadores, pilotos e controladores de tráfego aéreo, observados após a implantação de rotas RNAV/RNP nas TMA de Dallas, Atlanta, Phoenix e Las Vegas.

Já a Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA) tem direcionado seus esforços ao mercado latino-americano, visando estabelecer novas rotas diretas entre dois pontos, reduzindo o tempo de voo e também o consumo de combustível e as emissões de CO₂ dos motores, Souza [18].

O esforço da IATA é, primeiramente, persuadir as companhias aéreas, os aeroportos e a aviação civil regional a adotarem o RNP e a RNAV. Segundo Souza [18], a sequência natural é o suporte técnico prestado pelo órgão mundial para consolidar a adoção dos novos procedimentos, abrindo o caminho para uma surpreendente redução no consumo de combustível e nas emissões poluentes, acompanhados por uma melhoria nas condições de segurança de voo.

Na América Latina, onde as aerovias e procedimentos ATS ainda são, em sua maioria, baseados em auxílios no solo, a IATA atuou em parceria com companhias aéreas e entidades governamentais na elaboração de novos procedimentos baseados em RNAV/RNP e atingiu resultados expressivos em termos de segurança das operações, redução dos gastos de combustível, de emissões e do tempo de voo (Tabela 2.2)

Tabela 2.2 – Aplicação da RNAV/RNP na América Latina.

AÇÕES	RESULTADOS
Nova rota RNAV entre Cidade do Panamá e Buenos Aires (redução de 28NM)	Economia de 141 mil dólares e redução de 718 toneladas de CO ₂ por ano
Nova rota RNAV entre Santiago e São Paulo (redução de 25NM)	Economia de 822 mil dólares e redução de 2866 toneladas de CO ₂ por ano
Saídas e aproximações RNAV/RNP para o Aeroporto Internacional da Cidade do México	Economia de 53 milhões dólares e redução de 294 toneladas de CO ₂ por ano
Aplicação de procedimentos RNP para aproximação em Quito	Redução dos mínimos de aproximação e redução dos custos operacionais (10 milhões de dólares/ano)

Fonte: IATA [19].

Na literatura brasileira, o conceito PBN ainda é escasso e poucas são as intervenções no espaço aéreo. Algumas rotas RNAV já foram implantadas, mas estudos para implantação de

procedimentos PBN ainda estão na fase de concepção para algumas áreas de controle terminal. Pogianelo [20] adotou o método de RNAV na estrutura de rotas na TMA-RF.

Esta pesquisa analisa a estruturação da implantação de rotas PBN, bem como o comportamento do tráfego aéreo nestas rotas, em uma configuração de pistas paralelas, por meio de métricas relacionadas à eficiência do voo, como tempo e distância de voo.

2.1.2 SISTEMA GNSS

O Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS) é o termo padrão para um sistema de posicionamento geo-espacial com cobertura global, no qual, por meio de coordenadas, é estabelecida uma posição.

Até 2007, o único sistema de posicionamento global totalmente operacional era o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido pelo governo norte-americano. Em fase de reestruturação pelo governo russo, há o GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*), entretanto sua previsão de operacionalidade total está para o final de 2009.

Ainda em fase de testes há o GALILEO, desenvolvido pela União Européia com a finalidade de ser uma alternativa ou complemento ao GPS e ao GLONASS. A previsão de operacionalidade total deste sistema está prevista para 2013, GSA [21]. Há alguns sistemas de posicionamento de satélites apenas regional, como o IRNSS (*Indian Regional Navigational Satellite System*), QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*) e o Beidou, desenvolvidos pela Índia, Japão e China, respectivamente. Todavia, ainda não há previsão de sua expansão a nível global.

A ICAO, ao iniciar os estudos com GNSS para a navegação aérea, recebeu a oferta do sistema GPS pelos EUA como meio de apoio ao desenvolvimento da navegação aérea por satélites. Em outubro de 1994, os EUA oficializaram à ICAO a sua oferta de disponibilidade do GPS para uso aeronáutico, por um período mínimo de 10 anos, de modo contínuo em todo o globo, sem ônus para seus usuários, comprometendo-se a anunciar, com pelo menos 6 anos de antecedência, qualquer modificação na oferta ou descontinuidade operacional, DECEA [21].

O GPS é composto por três segmentos:

- a) Segmento espacial – composto por uma constelação de 24 a 32 satélites em operação ao redor da Terra, distribuídos em 6 órbitas a uma altitude de 20.200km. Cada satélite completa uma órbita em aproximadamente 12 horas (Figura 2.6);
- b) Segmento terrestre – composto pelos usuários do sistema: aeronaves, embarcações, veículos, pessoal, etc.;
- c) Segmento controle – composto por uma estação máster e cinco estações de monitoramento.

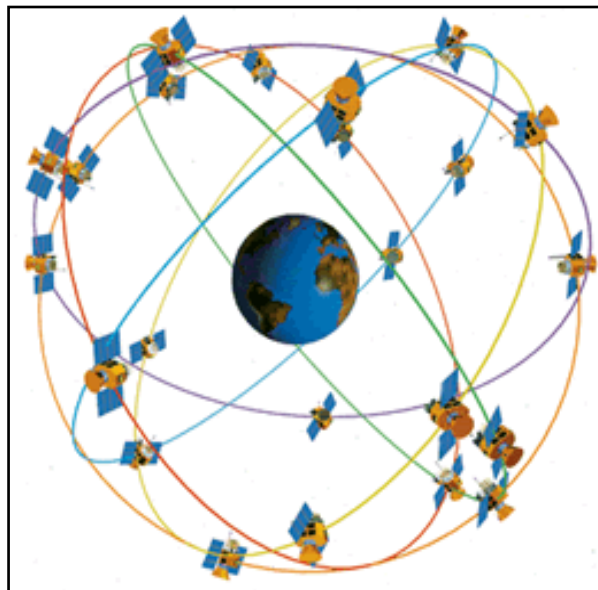


Figura 2.6 – Segmento espacial do sistema GPS.
Fonte: DECEA [21]

Em um sistema GNSS há ainda os sistemas de aumentação, que envolvem o uso de informação externa, integrada freqüentemente no processo do cálculo, para melhorar a acuracidade, a integridade, a disponibilidade ou a continuidade do sinal do satélite de navegação.

A fim de atender os requisitos de performance estabelecidos pela ICAO, tais sistemas podem ter sua aumentação baseada em satélites (SBAS), em solo (GBAS) ou a bordo de aeronaves (ABAS). No Brasil, está em fase de teste a utilização de antena GBAS, capaz de proporcionar a utilização do GNSS como meio de aproximação de precisão¹⁰. Até 2008, todos os procedimentos de aproximação GNSS no Brasil são de não-precisão¹¹.

O GNSS é utilizado como sensor pela navegação RNAV/RNP, dentro de requisitos específicos de utilização, para obtenção de dados geográficos para o cálculo de coordenadas. Além do GNSS, a ICAO também adota o VOR/DME, o DME/DME e o INS/IRS¹² para elaboração de procedimentos de navegação aérea RNAV/RNP, porém o GNSS é o único sensor capaz de atender os requisitos mínimos de acuracidade e disponibilidade em todas as fases de voo.

Segundo a ICAO [12], é responsabilidade do provedor de Serviço de Tráfego Aéreo assegurar que, onde auxílios baseados no solo são publicados como disponíveis para uso dentro de um espaço aéreo designado RNAV/RNP, existam auxílios suficientes para prover determinação contínua de posição de uma aeronave dentro daquele espaço aéreo, com a precisão requerida.

¹⁰ Procedimento de aproximação por instrumentos, baseado em dados de azimuth e de elevação da trajetória de planeio. (ILS, MLS, PAR).

¹¹ Procedimento de aproximação por instrumentos, baseados em orientação de rumo, porém sem orientação de elevação da trajetória de planeio (NDB, VOR/DME).

¹² INS – Sistema de navegação inercial e IRS – sistema de referência inercial. Ambos os sistemas são a base da navegação inercial.

Devido a estes fatores e aos problemas associados aos auxílios à navegação no solo (VOR e DME), tais como: quantidade mínima de equipamento necessária, manutenção, requisitos operacionais mínimos exigidos, entre outros, o Brasil adota apenas o GNSS como fonte de dados. Já o INS pode ser utilizado, com certas restrições em determinadas fases de vôo, no caso de perda da confiabilidade no GNSS.

Desde janeiro de 2008, a partir de avanços tecnológicos e estudos realizados pelo DECEA, o Brasil estabeleceu a utilização do GNSS como meio primário de navegação em todo espaço aéreo continental e oceânico, não dependendo mais da existência de outro procedimento convencional estabelecido em uma localidade.

2.2 MODELAGEM DE CIRCULAÇÃO AÉREA EM TMA

O Brasil, como país signatário da ICAO, adota suas normas e recomendações como legislação básica na elaboração e execução de procedimentos de navegação aérea, todavia, algumas características específicas da FAA, distintas dos modelos da ICAO, são também adotadas, além dos critérios emanados pelo DECEA que se caracterizam como “diferenças” das normas vigentes internacionais.

Nos estudos da FAA e EUROCONTROL, direcionados para reestruturação da circulação aérea com a introdução da navegação RNAV/RNP nas TMA, foram estabelecidos critérios que permitem um controle mais eficiente e seguro do tráfego aéreo por parte dos órgãos de controle.

Mayer [16] relata que, após as reestruturações feitas em área de terminal de Dallas, Phoenix, Las Vegas e Atlanta entre 2000 e 2004, a nova circulação trouxe benefícios aos operadores na forma de trajetória de descida mais suaves, mais favoráveis às fuselagens das aeronaves e

também benéfica aos controladores, de modo que proporcionou maior espaçamento entre as rotas e, conseqüentemente, melhor fluidez do tráfego, relacionada a uma melhora de seqüenciamento de convergência e de mudanças das velocidades dos vôos.

Assim como nos EUA, o EUROCONTROL [23] estabeleceu um estudo para três grandes aeroportos da Europa: Paris (Charles de Gaulle), Londres (Heathrow) e Frankfurt. Os resultados também apontaram para benefícios com a nova circulação.

De um modo geral, a circulação é estabelecida em 8 regiões, sendo 4 definidas por fixos de entrada e 4 definidas por fixos de saída, e têm como referência o eixo longitudinal da pista. (Figura 2.7).

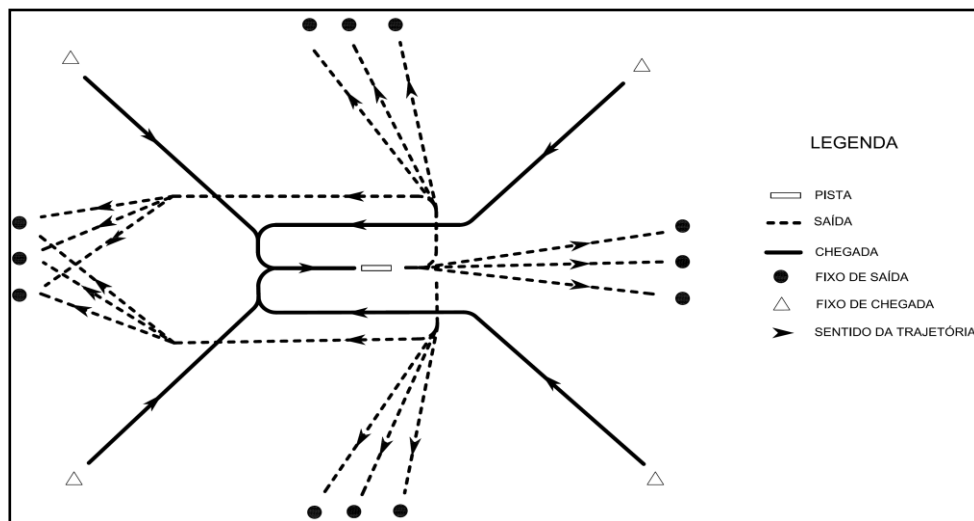


Figura 2.7 – Circulação aérea em TMA RNAV/RNP.

As rotas de saída são estabelecidas nas regiões de prolongamento da pista e perpendicular a este eixo, formando assim, quatro regiões que permitem um fluxo mais direto para as aeronaves.

As rotas de chegada são estabelecidas em diagonais intercaladas pelas regiões de saída. A partir dos fixos de entrada, as aeronaves são direcionadas ao aeródromo até ingressarem em uma rota paralela à pista ou diretamente para o ingresso no procedimento de aproximação

disposto no formato “T”(Apêndice D – figura D.4), conforme estabelecido pela ICAO [12], EUROCONTROL [24] e FAA [25].

Esta circulação permite uma coordenação para transferência de tráfego mais clara e eficiente entre os órgãos de controle (ACC e APP) e entre posições dentro do mesmo órgão (Alimentador e Final do APP).

Tal reestruturação foi realizada em cada aeroporto levando-se em conta o seu posicionamento (rumo da pista) em relação às aerovias, os obstáculos naturais e artificiais, os espaços aéreos restritos e zonas habitadas, de maneira que cada localidade adaptou as rotas de uma forma mais adequada ao seu uso. Todas as rotas são calculadas, em termos de tolerâncias, de gradientes, de áreas de proteção, de mínimos de liberação de obstáculos (MOC) e de velocidades.

No Brasil, esta remodelagem na estrutura de rotas ainda não foi estabelecida. Esta pesquisa aplica esta metodologia para circulação aérea durante a reestruturação das rotas PBN na TMA de Salvador estabelecidas para os cenários propostos (2 e 3).

2.3 O USO DE SIMULAÇÃO EM TRÁFEGO AÉREO

Segundo Chwif [26], os modelos para representar os sistemas podem ser classificados em: modelos simbólicos (ou icônicos), analíticos e modelos de simulação.

- Os modelos simbólicos (ou icônicos) são constituídos de símbolos gráficos, como retângulos e retas, utilizados para dar noção de sequência ou outras relações entre entidades;
- Os modelos analíticos, basicamente, podem ser reduzidos a um conjunto de equações que, ao serem resolvidas, permitem obter a solução esperada;

- Os modelos de simulação, por sua vez, são implementados por meio do auxílio de um computador e são excelentes para representar sistemas que possuem um número muito grande de variáveis e com dinâmica muito complexa.

Entretanto, Húpalo [27] relata que a fim de avaliar, estudar e validar conceitos de tráfego aéreo, “pesquisadores de sistema ATM baseiam-se, principalmente, em modelos e ferramentas computacionais por meio de métricas relacionadas com segurança, capacidade e eficiência”.

Ferramentas de simulação são freqüentemente usadas para propiciar soluções em sistemas complexos, podendo ser utilizadas para auxiliar o desenho, o planejamento ou aperfeiçoar o sistema em estudo. Os resultados de simulação são comumente utilizados como “apoio a decisão” a fim de permitir tomar as melhores decisões possíveis baseadas nas informações disponíveis.

Para Phillips [28], em grandes e complexos sistemas, tais como ATM de espaço aéreo e aeroportos, a simulação *fast-time* é uma importante ferramenta para o desenvolvimento de novos procedimentos, reestruturação do espaço aéreo e conceitos de controle. “É a opção mais econômica para estudos alternativos e que proporciona a redução nos altos custos presentes em sistemas reais ou simulações em tempo real” ISA [29].

A ICAO [1], a partir de 2008, estabeleceu processos de implementação de novos cenários de espaço aéreo. É um conjunto de 3 processos, subdivididos em etapas distintas, que inicia na concepção do espaço aéreo e termina na revisão pós-implementação.

Dentro do processo nº 3 (Planejamento e Implementação), a ICAO estabelece a FTS como parte da etapa de validação de segurança do espaço aéreo:

“A modelagem de espaço aéreo é uma primeira etapa benéfica porque proporciona algum entendimento de como a proposta de implementação irá trabalhar, assim, não requer a participação de controladores e pilotos. Se o espaço aéreo é modelado por computador, então é possível fazer mudanças rápidas e efetivas nas rotas ATS, esperas, estrutura de espaço aéreo ou setorização, a fim de identificar os cenários mais benéficos (...)”.

“Na fase de modelagem de espaço aéreo por computador, pode ser útil a simulação *fast-time* (FTS). Uma avaliação mais sofisticada do que a de um modelador de espaço aéreo, uma FTS processa resultados mais precisos e realísticos quando ainda não se requer a atividade de participação de controladores e pilotos (...)” (tradução do autor deste trabalho).

Esta orientação da ICAO para a utilização de FTS é corroborada pela FAA e EUROCONTROL [30] que, através de ação em conjunto, “estabeleceram o objetivo de promover o conhecimento mútuo entre EUA e Europa para o uso e desenvolvimento de FTS para modelagem de conceitos operacionais de tráfego aéreo”.

Esta ação estabeleceu estratégias que foram padronizadas como “*Best Practices*”, as quais estimulam, entre outros, o uso de FTS e RTS, a modelagem e comparação de cenários e o uso de picos de tráfego como a melhor forma de analisar conceitos futuros. Este trabalho aplica estas três orientações do desenvolvimento da PBN na TMA de Salvador.

2.3.1 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO EM SIMULAÇÃO

A simulação é o processo de projetar um modelo computacional a partir de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo, a fim de entender o comportamento do sistema e/ou avaliar estratégias para sua operação. A adição de muitos detalhes pode produzir complicações desnecessárias, e a retirada de características importantes pode invalidar o modelo.

Dentro do processo de simulação, de acordo com Sargent [31], podemos distinguir as etapas de verificação e validação, sendo esta última dividida em conceitual e operacional (Figura 2.8). Segundo Jain [32], um modelo computacional pode se encontrar nas seguintes categorias: não-validado e não-verificado; não-validado e verificado; validado e não-verificado; validado e verificado.

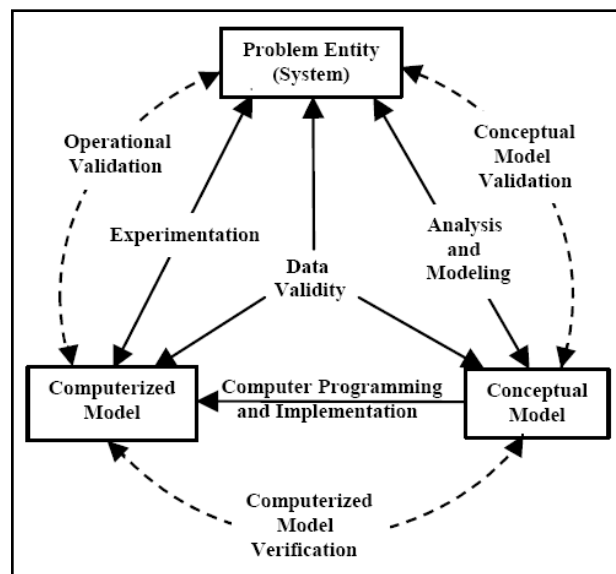


Figura 2.8 – Versão simplificada do processo de modelagem.
Fonte: Sargent [29]

A etapa de verificação consiste em confirmar se o produto de software é uma execução exata do modelo conceitual como foi projetado. Este processo assegura que o software execute as operações como foram descritas no modelo conceitual. O propósito da verificação está em fornecer um nível de garantia no estado atual e futuro, Sargent [31]. A verificação é descrita freqüentemente como a resposta da pergunta: “Construímos corretamente o modelo?”

Uma das dificuldades da simulação é o processo de validar os modelos projetados, ou seja, a etapa validação consiste em assegurar que o modelo e os inúmeros pressupostos e simplificações adotados no seu desenvolvimento sejam razoáveis e, se corretamente implementados, tenham um comportamento e produzam resultados semelhantes àqueles

observados nos sistemas reais, Jain [32]. A validação é descrita freqüentemente como a resposta da pergunta: “Construímos o modelo correto?”

Segundo Phillips [28], Balci [33] e Rao [34], os cenários futuros, ou seja, os que ainda não existem no mundo real, não podem ser validados, pois não há padrões de referência e comparação. Entretanto, este estudo estabelece alguns parâmetros que tendem a uma validação dos cenários de PBN que foram concebidos. Tais parâmetros serão descritos durante a etapa de modelagem.

Neste estudo, a validação foi considerada como um processo que reúne a validação de diversos parâmetros individualmente, tais como: horário de entrada no sistema, perfis de vôo, performance de aeronaves, tempo de ocupação de pista, entre outros.

Assim, como nos diferentes cenários existem parâmetros que não se alteram, dentre eles as performance de aeronaves e tempo de ocupação de pista, este estudo procedeu a validação destes parâmetros no processo de modelagem dos cenários futuros.

As diversas técnicas de validação são abordadas na literatura. Destaca-se o estudo de Balci [33] na classificação de técnicas de ensaio, verificação e validação de simulação (Figura 2.9).

Este estudo utiliza duas destas técnicas, sendo uma informal, com a participação de painéis de especialistas e uma dinâmica, com a revisualização radar. Estas técnicas serão detalhadas durante o Capítulo 4.

Na literatura existente, alguns autores abordam o termo calibração como uma etapa do processo de validação, entretanto este estudo abordará o termo calibração como parte da etapa de verificação. Assim, durante a verificação, a calibração foi realizada com base em métricas estabelecidas pela ICAO [12] para a elaboração de procedimentos e, por vezes, foram pequenos ajustes e adaptações do mundo real.

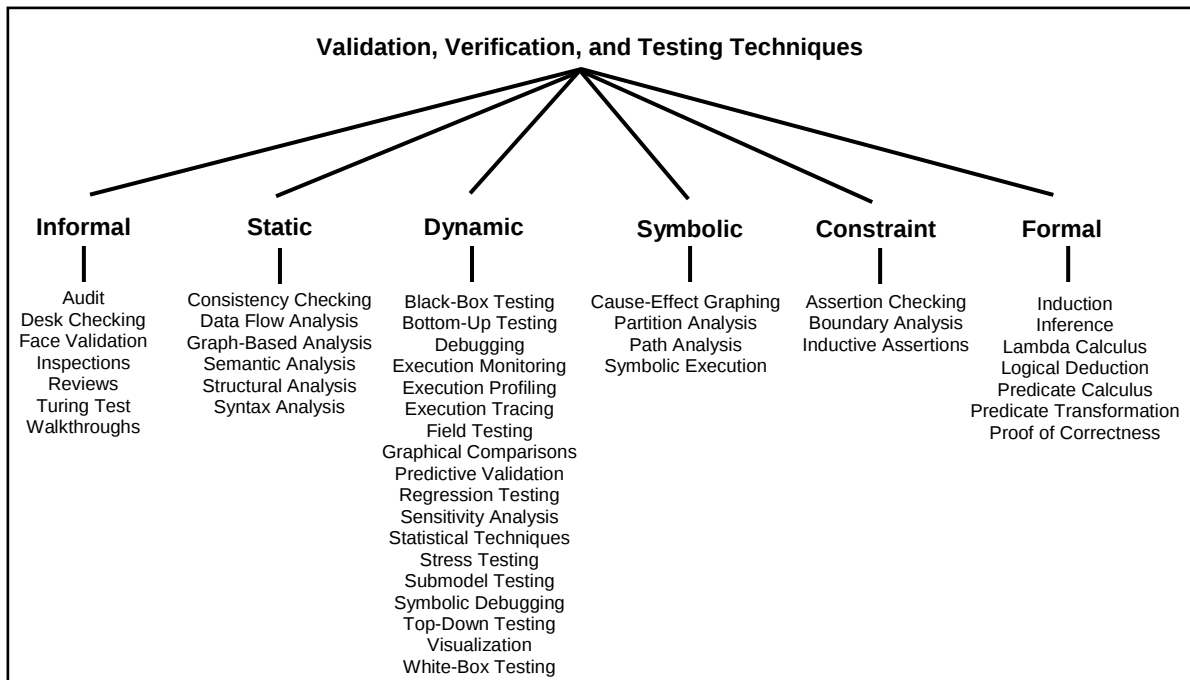


Figura 2.9 – Técnicas de ensaio, verificação e validação em simulação.

Fonte: Balci [33]

Esta pesquisa propõe etapas de modelagem de simulação para tráfego aéreo, com ênfase nas fases de verificação e validação. O critério abordado é uma adaptação dos modelos gerados por Uchôa [35] e Seila [36].

2.3.2 A FERRAMENTA RAMS PLUS

Para a simulação envolvendo gerenciamento de tráfego aéreo, são encontradas na literatura algumas ferramentas destinadas à modelagem, tanto para o espaço aéreo quanto para o movimento no solo em aeroportos. Para a modelagem do lado terrestre aeroportuário, destaca-se o SIMMOD (*Airport and Airspace Simulation Model*), desenvolvido na década de 80 pela FAA. Sua eficiência foi observada em estudos na região de São Paulo, com Santana [37], Húpalo [27] e Moser [38].

Para a modelagem do espaço aéreo, as principais ferramentas são o TAAM e o RAMS. O TAAM (*Total Airspace & Airport Modeller*) tem a capacidade de simulação *gate-to-gate*, na

qual engloba tanto espaço aéreo como aeroportos. O RAMS Plus 5.0 (*Reorganized ATC Mathematical Simulator*), foi desenvolvido inicialmente pelo EUROCONTROL na década de 90 e, atualmente, é produzido, mantido e distribuído exclusivamente pela ISA Software.

Assim como o TAAM, o RAMS é uma ferramenta de simulação para aeroportos e espaço aéreo, sendo este último sua grande vantagem perante as ferramentas concorrentes, pois foi desenvolvida principalmente para análise e avaliação da estrutura do espaço aéreo com vistas às novas tecnologias no ATM. Este foi um ponto fundamental para a escolha desta ferramenta para este estudo, além do programa de licenças acadêmicas gratuitas, promovido pela ISA Software, sem nenhum custo para as Universidades.

A ferramenta RAMS Plus foi concebida sob uma interface gráfica em plataforma *Windows*, contendo uma estrutura de dois componentes: Lado Aéreo e o Lado Terra, ISA [29]. Estes componentes podem ser trabalhados em conjunto ou separadamente e inclui funcionalidades tais como:

- a) Horário e perfis de tráfego (rotas, auxílios à navegação);
- b) Atrasos em aeroporto e tempo de ocupação de pista;
- c) TMA – SID, STAR, Esperas (órbitas), Descida contínuas
- d) Setorizações em 4D¹³;
- e) Controle de separações e resolução de conflitos (detecção e resolução de conflito em 4D);
- f) Ocupação de pista com razões de aceleração e desaceleração de aeronaves;
- g) Movimento de solo com capacidade de restrições de uso por tipo de aeronave;
- h) Alocação de gates.

Estas funcionalidades têm como objetivo primário:

¹³ 4D se refere a junção das três dimensões perceptíveis mais o tempo.

- a) Propor alternativas de setorização;
- b) Medir carga de trabalho de controladores e complexidade do espaço aéreo;
- c) Medir a segurança do espaço aéreo em relação à violação de separação;
- d) Estudo de novos conceitos ATM;
- e) Medir atrasos no táxi, para decolagem e para pouso;
- f) Propor a configuração, ou a inclusão, de novas pistas e pistas de táxi.

Na modelagem de gerenciamento de espaço aéreo e resolução de possíveis conflitos de tráfego, a utilização do RAMS tem demonstrado resultados eficazes em estudos da FAA, NASA e EUROCONTROL em áreas como meio ambiente (queima de combustível), procedimentos de navegação aérea, carga de trabalho de controladores e complexidade de espaço aéreo. Phillips [28] utilizou a ferramenta para análise do espaço aéreo no UK, Fogari [39] utilizou o RAMS como auxílio de análise econômica dentro do espaço do EUROCONTROL e Majumdar [40] fez uma análise de capacidade do espaço aéreo relacionada à carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo.

Apesar de sua utilização no Brasil ainda ser muito reduzida, destacam-se os estudos de Teixeira [41], na TMA de São Paulo, Oliveira [42], na TMA de Brasília e Pogianelo [20], na TMA de Recife. Duas das principais diferenças, apresentadas neste estudo em relação às outras pesquisas em cenário brasileiro, são a utilização das funções de resolução de conflitos e complexidade do espaço aéreo, que são detalhadas no Capítulo 4.

3. ESTRUTURA DO ESPAÇO AÉREO DO ESTUDO DE CASO

O espaço aéreo sob jurisdição do Brasil se superpõe ao território nacional, incluindo águas territoriais e jurisdicionais, bem como o espaço aéreo que se superpõe ao alto mar que tiver sido objeto de acordos internacionais, DECEA [43]. Salvo algumas diferenças de caráter específico do tráfego aéreo nacional, o Brasil segue as Normas e Recomendações emanadas pela ICAO e seu espaço aéreo divide-se em:

- a) Espaço Aéreo Inferior – que tem como limite inferior o solo ou a água e limite superior o FL 245 inclusive;
- b) Espaço Aéreo Superior – que tem como limite inferior o FL 245 (exclusive) e limite superior ilimitado.

Tal divisão vertical tem por finalidade estabelecer porções do espaço aéreo onde voem aeronaves de semelhantes performances. O foco deste estudo englobará ambos os espaços aéreos, pois serão considerados os perfis de voo das aeronaves desde o momento em que abandona a aerovia (nível de cruzeiro¹⁴) até o solo e vice-versa.

O espaço aéreo ainda recebe algumas designações para fim de prestação dos serviços de tráfego aéreo:

- a) Espaço Aéreo Controlado¹⁵ (ATZ, CTR, TMA, CTA e UTA);
- b) Região de Informação de Voo (*espaço aéreo não controlado*);
- c) Espaço Aéreo Condicionado (áreas proibidas, restritas e perigosas).

¹⁴ Nível de cruzeiro é o nível que se mantém durante uma etapa considerável do voo.

¹⁵ A distinção entre espaço aéreo, controlado ou não, se resume na capacidade de se manter comunicação bilateral contínua entre o órgão de tráfego aéreo e as aeronaves, ou seja, área de cobertura de frequência aliada a uma demanda de tráfego aéreo.

Dentre estas designações há uma classificação que varia de “A” a “G”, descrevendo para cada classe os critérios de prestação de serviço, o tipo de separação prevista e os mínimos requeridos para operação no espaço aéreo pretendido.

Atualmente, o espaço aéreo brasileiro é dividido em 5 Regiões de Informação de Vôo, dentre as quais, a FIR Recife é a região onde está situada a TMA-SV (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Divisão das Regiões de Informação de Vôo brasileiras.
Fonte: DECEA [3].

O cenário atual para o estudo compreende toda a estrutura de rotas ATS de Salvador, bem como a área de movimento¹⁶ do Aeroporto Internacional de Salvador. Este cenário abrange áreas de controle de três órgãos de tráfego aéreo da FIR Recife: Centro de Controle de Área de Recife (ACC-RE) no CINDACTA III [44] [45], Controle de Aproximação de Salvador (APP-SV) e Torre de Controle de Salvador (TWR-SV) no DTCEA-SV [46] a [49].

¹⁶ Área de movimento é a parte do aeródromo destinada ao pouso, decolagem e táxi de aeronaves e está integrada pela área de manobras e os pátios.

3.1 A ÁREA DE CONTROLE DA FIR RECIFE

A FIR Recife está situada na região Nordeste do Brasil e possui uma dimensão de mais de 2,5 milhões de km². Sua área se sobrepõe ao continente e a uma faixa oceânica que se estende do Maranhão ao sul da Bahia. Está sob a jurisdição do Terceiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA III).

3.1.1 CONFIGURAÇÃO

Atualmente a FIR-RE (Anexo X – Cartas ERC) está configurada da seguinte forma:

- a) Área de Controle Superior de Recife – UTA-RE – compreende toda área da FIR-RE, tendo como limite inferior o FL245 e o limite superior ilimitado. Apenas são permitidos os vôos IFR;
- b) Áreas de Controle Recife – composta pelas aerovias inferiores e Áreas Recife 1, 2 e 3:
 - I. Recife 1 – Conjunto de áreas circulares, com raio de 120NM sobre os principais VOR da FIR, tendo como limite inferior o FL085 e superior FL145. São permitidos vôos IFR e VFR;
 - II. Recife 2 - Área circular que se sobrepõe ao VOR de Teresina com aproximadamente de 100NM de raio, tendo como limite inferior o FL145 e superior FL245. São permitidos apenas vôos IFR;
 - III. Recife 3 - Conjunto de áreas circulares, com raio de 200NM sobre os principais VOR da FIR (exceto Teresina), tendo como limite inferior o FL145 e superior FL245. São permitidos vôos apenas vôo IFR;
- c) Regiões de Informação de Vôo – áreas abaixo do FL 245, exceto as áreas de controle, onde o tráfego aéreo não é controlado. São permitidos vôos IFR e VFR;

3.1.2 O ACC-RE E SETORIZAÇÃO

O ACC-RE é o órgão de controle responsável pela prestação dos serviços de controle de tráfego aéreo, assessoramento, informação de voo e alerta na FIR-RE. Sua subdivisão está composta em 8 setores, dos quais apenas 6 (setores 3, 4, 5, 6, 7 e 8) são o foco deste estudo, pois estão diretamente ligados a estrutura de rotas (SID e STAR) de Salvador (Figura 3.2).

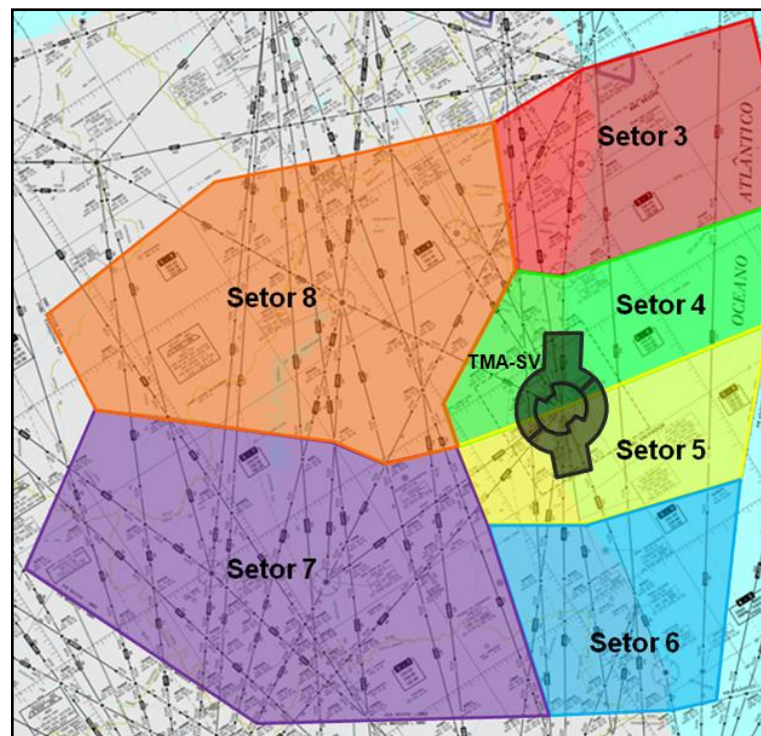


Figura 3.2 – FIR Recife - setores do ACC-RE.
Fonte: DECEA [3].

Os setores englobam apenas parte (cerca de 2/3 das distâncias voadas) destes procedimentos de saída e chegada. Os setores 4 e 5 são aqueles que concentram maior movimento de tráfego, pois estão adjacentes à TMA, disposto na linha do litoral no sentido norte-sul. Já os setores 3, 6, 7 e 8 contém apenas pequenos trechos de início ou final das rotas ATS.

A depender do volume de tráfego, do número de consoles radar, das frequências disponíveis e do número de controladores, estes setores podem ser agrupados ou não, a fim de fazer o melhor uso dos recursos disponíveis para o gerenciamento de tráfego aéreo.

Devido a estrutura de rotas convencionais, há um grande número de pontos de conflitos nas regiões próximas a TMA-SV, onde convergem as rotas ATS de chegada e conflitam com as rotas de saída. Esse fator aumenta excessivamente o número de comunicações de coordenação entre o ACC-RE e o APP-SV e, conseqüentemente, aumenta a carga de trabalho dos controladores, tornando-se fator limitante da capacidade do espaço aéreo.

As coordenações de transferência de tráfego geralmente ocorrem próximo ao limite da TMA-SV, em torno de 10NM, ou no cruzamento de nível de vôo, próximo ao FL140 (para as aeronaves saindo) e FL180 (para as aeronaves chegando). Entre as TMA adjacentes, abaixo do FL145 e ao longo da linha do litoral, o ACC-RE delega a função de controle das aeronaves aos APP, através do sistema chamado “passo-a-passo”.

3.2 A ÁREA DE CONTROLE TERMINAL DE SALVADOR

Área de Controle Terminal é um espaço aéreo controlado situado, geralmente, na confluência de rotas ATS e nas imediações de um ou mais aeródromos, DECEA [43]. Pode conter uma ou mais CTR¹⁷, e possuir uma configuração variável, tanto de limites verticais como laterais.

O órgão de controle que tem jurisdição nas TMA e CTR e é responsável em prestar o serviço de controle de tráfego aéreo é o APP. Apesar dos limites inferiores de uma TMA não serem o solo ou água, e sim o limite superior de uma CTR, estes serão considerados para efeito de prestação de serviços ATS.

¹⁷ Espaço aéreo envolvendo um ou mais aeródromos próximos e capaz de conter as trajetórias dos procedimentos de aproximação e saída por instrumentos. Estende-se do solo até um limite superior especificado.

3.2.1 CONFIGURAÇÃO

A TMA-SV possui uma área de jurisdição com 40NM de raio, com centro na coordenada 12° 54,39'S/ 038° 19,28'W, além de uma área que se estende a 15 NM para cada lado da aerovia que liga Salvador a Aracaju e Ilhéus até o ponto médio das TMA adjacentes (Tabela 3.1).

Inserida na TMA está somente uma CTR, de 20NM de raio no entorno do Aeroporto Internacional de Salvador, entretanto, outros aeródromos públicos de menor porte e não controlados estão dentro de sua jurisdição, como o Aeroclube da Ilha de Itaparica que se destaca pelo número de movimentos de aeronaves em vôo VFR (Anexo II).

Ainda localizados dentro dos limites da TMA, encontram-se corredores visuais ao longo da linha do litoral, com configuração variável, nos quais circula todo tráfego de pequeno porte sob regras de vôo visuais, principalmente na ligação Salvador-Itaparica e Salvador-Morro de São Paulo DECEA [50] (Anexo III). Por fim, três pequenos corredores para aeronaves sem transponder foram elaborados a fim de permitir que tais aeronaves entrem e saiam da CTR.

Tabela 3.1 – Configuração da TMA e CTR de Salvador.

LOCAL	LIMITES LATERAIS	LIMITE VERTICAL INFERIOR	LIMITE VERTICAL SUPERIOR	CLASSIFICAÇÃO	SERVIÇO PRESTADO
TMA	40NM	FL 025	FL 145	C ¹⁸	CONTROLE, INFORMAÇÃO e ALERTA
	DE 15NM ATÉ 40NM ¹⁹	MSL ou GND	FL 025 inclusive	G ²⁰	INFORMAÇÃO e ALERTA
CTR	20NM	MSL ou GND	FL 025 exclusive	C	CONTROLE, INFORMAÇÃO e ALERTA
CORREDOR VISUAL	Possuem configuração variável verticalmente e se estendem ao longo da linha do litoral				
REAST ²¹	Possuem configuração variável ao longo da linha do litoral e interior				

Fonte: DTCEA-SV. AIP-MAP [49].

¹⁸ Espaço aéreo no qual são permitidos vôos IFR e VFR; todos os vôos estão sujeitos ao serviço de controle de tráfego aéreo; os vôos IFR são separados entre si e dos vôos VFR; os vôos VFR são separados apenas dos vôos IFR e recebem informação de tráfego em relação aos outros vôos VFR e aviso para evitar tráfego quando solicitado pelo piloto.

¹⁹ Área de jurisdição do Centro Recife delegada ao Controle de Aproximação de Salvador.

²⁰ Espaço aéreo no qual são permitidos vôos IFR e VFR, recebendo somente serviço de informação de vôo.

²¹ Rotas especiais para aeronaves sem equipamento transponder (identifica a aeronave na tela radar) que, em casos especiais, não podem atender às exigências de obrigatoriedade quando em vôo em espaço aéreo controlado.

A TMA de Salvador possui alguns recursos técnicos para auxiliar a prestação dos ATS:

- a) Auxílios à navegação:
 - a. VOR – SVD (116,50 MHz);
 - b. DME – SVD (Canal 112X);
 - c. NDB – SVD (275 KHz), IS (220 KHz) e IP (240 KHz);
 - d. ILS – LLZ (109,30 MHz – RWY 10 e ILR (110,30 MHz – RWY 28).
- b) Frequências: 119,35 MHz, 119,80 MHz e 120,80 MHz.
- c) Radar – TA10M (radar de terminal) e LP23 (radar de rota).
- d) ATIS²² - frequência 127,75.

Esta estrutura de auxílios permite a configuração de uso de procedimentos de navegação aérea, que totalizam 5 STAR²³, 17 IAP²⁴, 23 SID²⁵, 5 REA²⁶ e 1 VAC²⁷ (Anexo 4). A maioria dos autores não considera os radares como auxílio à navegação, entretanto, em Salvador há aproximações IFR que são baseadas exclusivamente nestes equipamentos.

Todo espaço aéreo que se sobrepõe a TMA-SV possui cobertura radar, entretanto, não há regiões de entrada e saída da TMA bem definidas, o que requer maior atenção e coordenação por parte de controladores. Exceto o setor Leste (E), voltado para o oceano, todos os demais setores possuem convergência de rotas de saída e chegada, gerando maior número de conflitos.

Tal estrutura está baseada em 3 auxílios, um ao norte e fora dos limites da TMA (NDB Alagoinhas) e dois na própria área patrimonial do aeródromo (NDB e VOR Salvador), o que

²² Serviço Automático de Informação Terminal - Provisão de informações regulares e atualizadas para as aeronaves que chegam e que partem, mediante radiodifusões contínuas e repetitivas, durante todo o dia ou durante uma parte determinada do mesmo.

²³ Rotas Padrão de Chegada – é uma transição entre a aerovia e o procedimento de aproximação.

²⁴ Procedimentos de aproximação por instrumentos.

²⁵ Saídas padrão por instrumentos.

²⁶ Rotas especiais para aeronaves – corredores visuais.

²⁷ Carta de Aproximação Visual – contém os circuitos de tráfego do aeródromo para operação VFR.

difículta uma maior flexibilização dos procedimentos, bem como aumenta o tempo e distância percorridos pelas aeronaves.

3.2.2 O APP-SV E SETORIZAÇÃO

O órgão de controle responsável em prestar os serviços ATS nos espaços aéreos descritos na Tabela 3.1 é o APP-SV. Além de suas atribuições normais, uma particularidade se aplica aos APP que estão localizados na linha do litoral do Nordeste, incluindo, neste caso, o APP-SV.

Com a proximidade entre as TMA adjacentes, os referidos APP trabalham, por delegação do ACC-RF, entre os FL145 e o solo ou água, no “sistema passo-a-passo”. Este sistema impacta diretamente na capacidade de controle de uma TMA através do número máximo permitido por setor.

Dentro da TMA, o APP-SV é responsável pela autorização dos procedimentos de navegação aérea, incluindo chegada, aproximação e saída. Tais procedimentos, exceto um procedimento GNSS para RWY 28, ainda estão baseados em equipamentos de solo (NDB, VOR, DME). Devido à pequena quantidade desses equipamentos, as rotas existentes penalizam as aeronaves com vôos mais longos e conseqüentemente, maiores consumos de combustível, além de maior permanência dentro de um mesmo setor.

O APP-SV possui 6 setores (1 – Final RWY10, 2 – Final RWY28, 3 – Final RWY17, 4 – Final RWY35, 5 – Alimentador Norte e 6 – Alimentador Sul). Entretanto, devido a quantidade de frequências, controladores e consoles radar, apenas 3 destes setores podem ser ativados ao mesmo tempo (Figura 3.3).

Os setores Finais RWY17 e RWY35 sempre estarão agrupados em um único setor com o Final RWY10 ou Final RWY28, a depender da pista em uso. Nos períodos de alta estação, há

um aumento no volume de tráfego de pequeno porte nos corredores visuais e, por vezes, é ativado um setor “Visual”, estabelecido em modelo operacional do órgão. Neste caso, os setores Alimentadores são agrupados em um único setor.

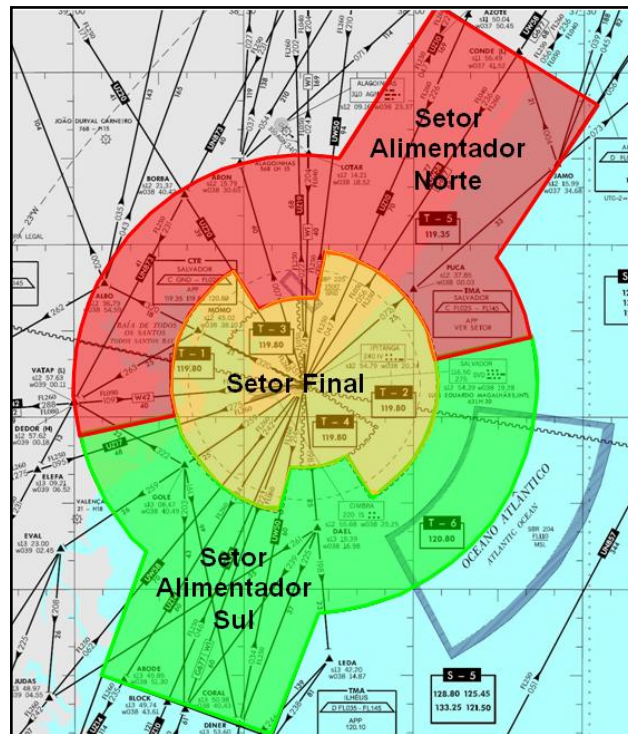


Figura 3.3 – TMA Salvador - setores do APP-SV.
Fonte: DECEA [3].

Os setores Finais, quando agrupados, assemelham-se a uma área circular, com centro no aeródromo, de raio de aproximadamente 23NM. As transferências de controle entre alimentadores e final, para as aeronaves chegando, ocorrem em torno de 5NM para esta borda de setor. Já as aeronaves saindo, após liberação de frequência pela TWR, passam a escuta diretamente para o setor alimentador, independentemente de altitude ou localização.

3.3 O AEROPORTO INTERNACIONAL DE SALVADOR

Construído no período da Segunda Grande Guerra, o Aeroporto Internacional Deputado Luís Eduardo Magalhães possui uma área patrimonial de aproximadamente 10,5 milhões de m² e uma capacidade de 6 milhões de passageiros INFRAERO [50] (Figura 3.2).

Está situado a 28km do centro de Salvador, numa área entre dunas e vegetação nativa. O aeroporto dispõe de uma nova infra-estrutura aeroportuária de TPS e pátios inaugurada em 2001. Há 6 pátios de aeronaves, distribuídos em 2 para aeronaves militares, 2 para aviação geral e 2 para aviação regular contendo 24 boxes (11 com pontes de embarque e 13 posições remotas).



Figura 3.4 – Aeroporto Internacional de Salvador.

3.3.1 PISTAS E CIRCUITO DE TRÁFEGO

O Aeroporto Internacional de Salvador possui duas pistas em configuração de rotas convergentes (Anexo V). A pista principal (pista 10/28) mede 3005x45m e a secundária (pista 17/35) mede 1520x45. Sua configuração tinha a finalidade, no período de construção, de facilitar o pouso com configuração adversa de ventos no litoral nordestino, tendo em vista a falta de equipamentos de precisão para pouso e os tipos de aeronaves no período.

Com base nos dados do DTCEA-SV [52], 96% dos movimentos do aeródromo durante o ano são realizados na configuração com as pistas 10 e 17. O seqüenciamento de pousos e decolagens é efetuado em ambas as pistas.

Os circuitos de tráfego são formados para cada pista individualmente (Anexo VI). O circuito da RWY 10/28 é efetuado a 1500 ft de altura e o da RWY 17/35 a 1000ft de altura. Algumas características particulares de seqüenciamento são realizadas para estes circuitos para que não haja pousos simultâneos, visando à segurança das aeronaves em termos de separações mínimas e efeitos de esteira de turbulência.

Devido a configuração de pistas convergentes, em relação aos tráfegos com plano de voo VFR, quando houver decolagem da pista 17 com curva à esquerda ou da pista 10 com curva à direita, a TWR SV não transfere as comunicações ao APP antes da aeronave cruzar a outra pista ou tenha certeza que não há conflito com aeronave no circuito ou decolando.

3.3.2 A TWR-SV

O órgão de controle responsável pela área de manobras²⁸ e pelo circuito de tráfego do aeródromo é a TWR-SV. Localizada próximo ao pátio principal, após a reforma de ampliação do TPS em 2001, parte da visibilidade da pista secundária e de parte das pistas de taxiamento que dão acesso à esta pista foram obstruídas pelo novo prédio.

Assim, um fato particular que afeta diretamente a capacidade do aeródromo é a prestação de serviço de informação de voo apenas às aeronaves e veículos que operam nesta porção do aeródromo, ou seja, os tráfegos não estão sujeitos ao controle de tráfego aéreo e, conseqüentemente, a fluidez fica restrita.

A TWR-SV possui 3 frequências operacionais, distribuídas em posição torre (118.30 Mhz), posição solo (121.90 MHz) e posição autorização (121.10 Mhz). Estas posições operacionais

²⁸ Área de manobras é a parte do aeródromo destinada ao pouso, decolagem e táxi de aeronaves, excluídos os pátios.

podem ser agrupadas e desagrupadas em períodos de pouco e grande movimento, respectivamente.

3.3.3 O PROJETO DE AMPLIAÇÃO

A reforma do aeroporto em 2001 não contemplou a modificação das características físicas das pistas de pouso, assim, a capacidade atual do lado aéreo do aeródromo está relacionada a configuração de pistas convergentes. A configuração que geraria uma maior capacidade do lado aéreo seria a implantação de pistas paralelas, em uma distância igual ou superior a 1035m, permitindo aproximações IFR simultâneas independentes, ICAO [53].

Após a ampliação de 2001, estudos foram desenvolvidos pela administração aeroportuária para um projeto que contemplaria a ampliação do TPS, com a criação de mais 3 módulos (conceito *pier*²⁹), a remodelagem de acessos viários e a implantação de uma pista paralela à pista principal, separada cerca 1300m entre eixos e decaladas em, aproximadamente, 1500m (Anexo 1).

Apesar do projeto não ter sido iniciado, a capacidade instalada do TPS para 6 milhões/ano de passageiros já foi atingida pela atual demanda. Outro fator importante é que não houve, até a presente data, nenhum estudo de comportamento de tráfego na TMA, com a utilização de pistas paralelas, que representasse o real ganho da nova configuração de pistas. Neste estudo se procura avaliar este comportamento através de algumas métricas descritas no Capítulo 5.

²⁹ Conceito baseado na distribuição física do terminal, no qual a *interface* entre o terminal e as aeronaves se dá em corredores originados em um prédio central. As aeronaves são posicionadas ao longo do eixo do *pier*.

4. METODOLOGIA

4.1 ETAPAS DE MODELAGEM PARA SIMULAÇÃO ATM

Na literatura encontramos diversos autores que apresentam etapas de modelagem para simulação computacional, entretanto poucos são os estudos direcionados à modelagem de gerenciamento de tráfego aéreo e, dentre estes, às particularidades do cenário brasileiro.

Este trabalho procurou estabelecer etapas de modelagem de simulação *fast-time* ATM, com ênfase nas fases de verificação e validação. O critério abordado é uma adaptação dos modelos gerados por Uchôa [35] e Seila [36], seguindo as orientações da ICAO [1] e das “Best Practices” emanadas pela FAA/Eurocontrol [30].

Tais modelos de Uchôa [35] e Seila [36] apresentam fases de simulação computacional de forma genérica e, portanto, não se aprofundam quais as técnicas de verificação e validação que devem ser adotadas em estudos específicos de um processo ATM.

Há uma divergência entre os dois autores quanto número de fases. Enquanto Uchoa apresenta 4 fases, Seila apresenta 13 fases. Esta diferença está relacionada diretamente no agrupamento de alguns processos em uma única fase, tais como: coleta de dados, construção do modelo, verificação e validação.

Na adaptação, adotada neste estudo, são inseridas as orientações da ICAO e FAA para a coleta de dados de tráfego aéreo em períodos de pico, bem como técnicas de verificação e validação voltadas para simulações ATM, tais como painel de especialistas e revisualização radar.

Por último, neste estudo não é adotada a fase final denominada “implementação”, abordada por ambos os autores, pois como recomendação da ICAO, a implementação de cenários futuros ATM só acontece após a utilização de simulação em tempo real (RTS), que não é escopo desta pesquisa.



No processo são descritas 6 etapas sucessivas, desde o planejamento até a documentação final.

Etapa 1- Planejamento

Etapa que estabelece a formulação do problema, definição dos objetivos, cronograma de atividades, escolha de ferramenta de simulação. Nesta etapa são identificados os requerimentos básicos de espaço aéreo e de infra-estrutura e definido o escopo do estudo.

A escolha da ferramenta de simulação mais apropriada é feita a partir da definição do escopo, com isto é possível determinar aquela que melhor apresenta os recursos voltados para o cenário de análise (lado aéreo, lado solo ou híbrido).

Etapa 2- Modelagem

Fase da concepção do modelo, estabelecimento de cenários, nível de complexidade, coleta de dados (período de análise, tráfegos, cartas aeronáuticas, órgãos de controle), identificação dos parâmetros, entrevistas com especialistas e construção do modelo.

A modelagem de cenários é feita a partir de um cenário “base” de comparação. Este cenário será a referência em relação à introdução de conceitos futuros. Quanto maior as alternativas de cenários, maior a possibilidade de análise e avaliação.

Durante a coleta de dados é importante o uso de “picos” de tráfego. Segundo FAA/EUROCONTROL, em simulações de tráfego aéreo é importante “impor alto nível de carga de trabalho de controladores a fim de testar os limites de novos conceitos do sistema de tráfego aéreo”. Níveis baixos de movimentos de tráfego poderão incorrer em erros operacionais ou em baixos níveis de complexidade.

Para a criação de cenários é essencial a coleta de 3 séries de parâmetros do sistema ATM: aeronaves (performance, tipo, *mix* e geração de tráfegos), geometria do espaço aéreo (setores, auxílios à navegação, aerovias, áreas de controle, pistas, táxis, pátio, etc.) e procedimentos de tráfego (separações, carga de trabalho, seqüenciamentos, etc.).

A coleta deve ser feita cuidadosamente de fontes oficiais de ATM. Datas de publicação em vigor, tais como as cartas aeronáuticas, são imprescindíveis para a construção correta do cenário. Entrevistas com especialistas de órgão de controle proporcionam o entendimento fundamental de execução de procedimentos ATS. Os dados de tráfegos necessitam ser analisados e, se necessário, corrigidos antes de serem colocados no sistema.

Os objetivos devem estar claros para a modelagem dos cenários. A complexidade do modelo não deve ser maior que aquela requerida para alcançar os objetivos do estudo, pois poderá ocorrer o aumento dos custos e tempo. Segundo a FAA, é gasto de 20% a 30% do tempo com

a preparação de cenários. O modelo deve ser uma representação simplificada do sistema, porém, ele deve incluir detalhes suficientes para que seja estabelecida uma boa aproximação do mundo real.

Etapa 3 - Verificação

Etapa de verificação do modelo conceitual (utilização da Ficha de Verificação, Apêndice A) e verificação do modelo operacional (utilização da Ficha de Verificação, Apêndice B), utilização de animação, verificação de *outputs* e entrevistas com especialistas;

A verificação do modelo conceitual está relacionada aos dados “estáticos”, ou seja, características de cada entidade que não variam no modelo, dentre elas:

- a) Na ferramenta: verificação da base de dados já existente no programa, tais como os dados topográficos (altitude, coordenadas), o datum selecionado, a declinação magnética, verificação das conversões de medidas de tempo, velocidade e distância;
- b) No solo: comparação das coordenadas dos aeródromos, tamanho e localização de pistas, pistas de taxi, pátio, boxes de estacionamento, etc. com as existentes em publicações aeronáuticas oficiais;
- c) No espaço aéreo: verificação de fixos e auxílios à navegação (coordenadas geográficas e erros de tolerância), rotas ATS, áreas de controle, espaços aéreos condicionados, limites de setores;
- d) Nas aeronaves: verificação do modelo, categoria, dimensões, raio de giro, *bank angle*³⁰.

³⁰ Raio de inclinação de curva da aeronave. É específico para cada fase de um procedimento de navegação aérea.

A verificação do modelo operacional está relacionada aos dados “dinâmicos”, ou seja, que possuem aleatoriedade no sistema ou que se referem a um procedimento específico de um espaço aéreo, aeroporto ou órgão de controle:

- a) No solo: tempo de ocupação de pista, variação do ponto de toque, distribuição aleatória de tempo de *push-back*, tipo de uso de taxi e boxes;
- b) No espaço aéreo: mínimos de separação previstos em legislação em cada espaço aéreo designado, restrições de velocidade e altitudes nos procedimentos, tipo de serviço ATS empregado;
- c) Na aeronave (associado a performance): velocidades para cada fase de vôo, altitudes nos procedimentos, razões de descida, aeródromo de origem/destino, tempo de entrada no sistema, nível de vôo;
- d) No ATM: calibragem do tempo de carga de trabalho de controladores, quantidade de tarefas de controle, pontos de *hand-off*³¹, parâmetros de complexidade do espaço aéreo.

A verificação é um constante trabalho de observação e comparação dos *outputs*, da animação, que requer análise e calibração (quando necessária) dos parâmetros do sistema. É considerado por alguns autores como “*debugging process*” (eliminação de erros e enganos de uma programação de computadores).

Etapa 4 - Validação

Fase de confirmação do modelo. Esta etapa envolve uma coleta de dados do mundo real e da simulação e uma comparação entre eles, de forma a assegurar que eles não diferem substancialmente.

³¹ Pontos de coordenação de tráfego aéreo onde há a transferência de tráfego entre órgão de controle ou entre setores de um mesmo órgão.

Existem várias técnicas que podem ser aplicadas, a depender do tipo de *outputs* analisados. Os métodos mais comuns são: análise estatística e de sensibilidade de parâmetros como tempo e distância de vôo, números de aeronaves por hora (decolando, pousando ou em um setor), velocidades empregadas nas fases de vôo, dentre outras.

Este estudo propõe a adoção de entrevistas com painel de especialistas e a utilização de revisualização radar (caso disponível). O painel de especialistas poderá confrontar diferentes experiências e técnicas de controle e gerenciamento, além de permitir uma percepção de uma operação padrão ou procedimentos esporádicos (mudanças de rotas e de altitude, esperas no solo e no ar, aproximação perdida, etc.).

A revisualização radar, quando acompanhada de entrevistas com especialistas e registros documentados (livro de ocorrência), fornece um entendimento claro das ocorrências de uma operação de tráfego aéreo. A dificuldade existente está relacionada ao grau de sigilo das gravações e à disponibilidade dos dados, pois poucas são as localidades onde há registro radar.

Etapa 5 - Produção

Nesta fase são realizadas as gerações de *outputs*, as análises de desempenho, número de repetições, comparação entre os cenários e análise dos resultados. Esta fase está relacionada às métricas pré-estabelecida na fase de planejamento.

Etapa 6 - Documentação

Confecção de documentação da simulação, contendo entre outros: memorial descritivo, tempos de simulação, dificuldades encontradas, limitações de uso, ganhos de simulação, resultados encontrados e recomendações para tomada de decisão.

4.2 COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados inicialmente de dois bancos de dados distintos existentes no Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Salvador (DTCEA-SV): Banco de dados do Sistema de Gerenciamento de Torre de Controle – SGTC, DTCEA [52] e Banco de dados de Fichas de Progressão de Vôo (FPV), DTCEA [54].

O banco de dados do SGTC contém informações do plano de vôo das aeronaves, tais como: matrícula, origem/destino, nível de vôo, hora de decolagem/pouso, condições de operacionalidade do aeródromo (visuais ou por instrumentos), entre outros. Estes dados são inseridos no sistema pelo controlador da TWR-SV e não estão relacionados automaticamente com os dados do Controle de Aproximação e, portanto, não contemplam os horários de entrada e saída da TMA-SV, nem os horários de início de um procedimento STAR.

Os dados de controle de aeronaves do APP-SV ficam registrados no programa FPV (Ficha de Progressão de Vôo), visto que o sistema de gerenciamento das consoles radar não é automatizado. A estrutura de consoles atual é gerenciada pelo sistema MITRA que não possui banco de dados automatizados e nem é interligado com o radar ou com a torre de controle, ou seja, os dados são coletados manualmente através de fichas de papel e, posteriormente, armazenados em banco digital.

A dificuldade existente neste programa é a interpretação dos dados. Os dados contidos do FPV computam apenas os horários do primeiro e último contato entre a aeronave e o órgão de controle, não sendo registrados dados importantes como matrícula, tipo da aeronave, rotas de chegada/saída, nível de vôo, origem/destino, entre outros.

Os dados do FPV são então confrontados com os dados do SGTC para tentar localizar os dados de aeronaves de sobrevôo na TMA no sistema “passo-a-passo”. Entretanto, mesmo

localizando tais vôos, não é possível precisar dados de origem/destino, tipo da aeronave, nível de vôo, entre outros, e que tem importante papel na geração de *inputs* para a simulação.

Em uma análise de confronto dos dados de ambos os sistemas, foi percebido que os tráfegos em cruzamento eram, em média, aproximadamente 3% do volume de tráfego gerado na TMA. Assim, para este estudo, devido à imprecisão do FVP, estes dados foram descartados e foram simulados apenas os tráfegos gerados pelo SGTC.

Além da dificuldade apresentada, houve a necessidade de seleção dos dados apresentados no SGTC. Continham inúmeros erros de digitalização e falta de dados nos campos a serem preenchidos, que necessitaram ser cuidadosamente analisados e reestruturados de forma que pudessem ser inseridos nos modelos do programa de simulação computacional.

Seguindo as orientações da FAA/EUROCONTROL, a coleta de dados procurou estabelecer inicialmente o dia pico de cada mês entre Janeiro de 2003 a Setembro de 2007 (meses e anos da coleta). Esta primeira restrição imposta na seleção dos dados para o referido período foi determinada pelo fato que, a partir de Janeiro de 2003, entrou em vigor a nova circulação aérea na região Nordeste do país.

Naquele período foram introduzidas novas rotas para cada aeroporto (aerovias, saídas, fixos), além da criação de STAR para a TMA-SV, não se estabelecendo uma correlação de dados com a configuração pré-Janeiro de 2003.

Posteriormente, com uma nova análise da amostra, foram constatadas distorções na amostra do período pós queda da aeronave GOL 1907, em 29 de setembro de 2006, chamado “apagão aéreo”. Neste período conturbado houve inúmeros atrasos em vôo e no solo, cancelamentos de vôos na maioria dos grandes aeroportos brasileiros e problemas técnicos relacionados com comunicações e vigilância dos órgãos de controle.

Neste contexto, foram observados vários fatores que influenciaram diretamente a baixa qualidade dos dados de Salvador, tais como: redução aleatória do número “N” e da capacidade de setor, aumento aleatório das separações entre aeronaves, tempo em excesso nos pátios e saturação da capacidade aeroportuária, diversos problemas pontuais de origem técnica nos equipamentos de auxílio à navegação e de vigilância radar.

Foi estabelecida então, para este estudo, uma nova restrição para o período de coleta de dados a partir de outubro de 2006. Portanto, os dados analisados estão compreendidos entre Janeiro de 2003 a Setembro de 2006, totalizando 45 dias picos, ou seja, um da cada mês no período selecionado (Anexo VII).

Foram percebidos também detalhes importantes que afetavam diretamente a quantidade de tráfego registrada no SGTC, como por exemplo, o número de toques-e-arremetidas em um mesmo dia, que pouco influencia na TMA, mas eleva consideravelmente a estatística de movimento no aeródromo e, conseqüentemente, alterava a capacidade de pista.

Na seleção dos dias-pico de cada mês, este estudo levou em consideração, além do número de movimentos diários, a natureza do tráfego no aeródromo (regular, geral, militar, toque-e-arremetida, voo de *check*, etc) (Figura 4.1). A relação da natureza do tráfego é importante em localidades como Salvador, estratégica Base Aérea, que é utilizada freqüentemente como área de manobra militar.

Foi possível verificar a heterogeneidade dos tipos de aeronaves que operam naquele aeroporto e a complexidade na estrutura de rotas existentes para atender tal demanda, tais como: procedimentos específicos para voo visual, aproximações de alta performance, áreas de treinamento militar, rotas especiais para aeronaves sem transponder, etc.



Figura 4.1 – Proporção do tipo de aviação no aeroporto de Salvador.
Fonte: DTCEA-SV [52]

Mesmo com uma seleção criteriosa dos dados, há situações não observáveis do período e que poderiam influenciar diretamente no movimento de tráfego aéreo:

- a) Condições meteorológicas adversas (chuvas, trovoadas, rajadas de vento, etc.);
- b) NOTAM de impraticabilidade de porção da área de movimento (pista, pista de taxi e pátio) ou de inoperâncias de auxílios à navegação (VOR, DME, NDB, ILS, etc.);
- c) Espaço aéreo condicionado ativado (paraquedismo, área de tiro, manobra militar, etc.);
- d) Eventos na localidade que gerem aumento de movimento, principalmente na aviação geral (campanha eleitoral, missão presidencial, visitas de autoridades civis, feiras, etc.);
- e) Inoperância do radar;
- f) Experiência da equipe de serviço (controladores, instrutores, supervisores e checadores) e da tripulação a bordo.

Entretanto, foi possível observar alguns eventos que se apresentavam de forma esperada (período de férias e carnaval) em que há um aumento do tráfego aéreo na região metropolitana

de Salvador, além dos períodos de treinamento e missão de patrulha marítima inerente ao tráfego militar baseado naquele aeroporto (Figura 4.2).

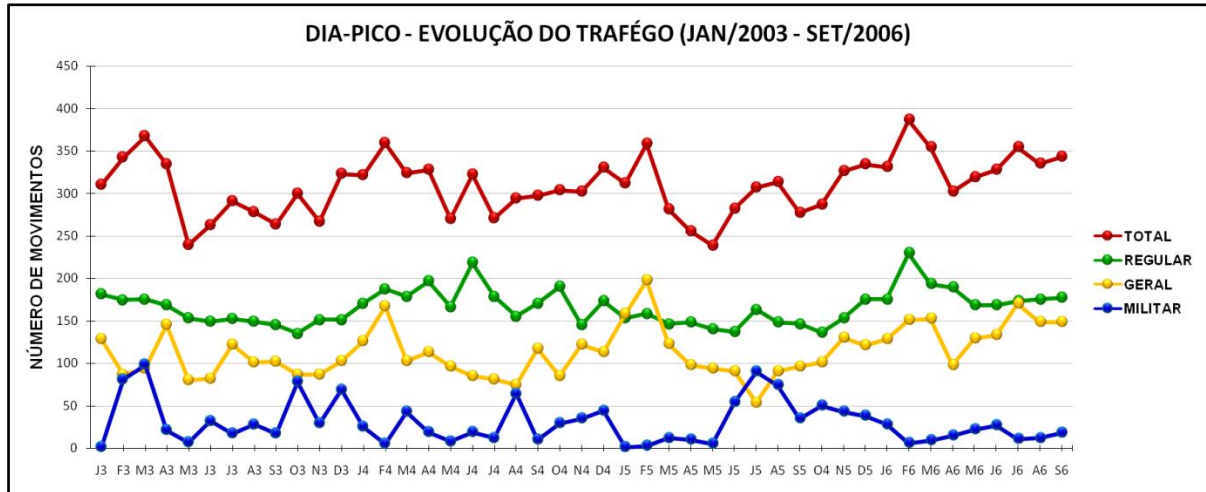


Figura 4.2 – Evolução mensal dos dias-pico de tráfego aéreo em Salvador.
Fonte: DTCEA-SV [52]

Os treinamentos e missões de patrulha marítima do tráfego militar local acontecem semanalmente, porém de forma aleatória devido à doutrina de segurança nacional. Porém, a partir de 2005 até 2006 houve uma redução desse tipo de manobra militar que refletiu diretamente na utilização daquela aeronave.

Por vezes, a quantidade de aeronaves militares distorce o real movimento de tráfego no aeródromo e, em particular neste estudo, estes dias atípicos pouco acrescentam na análise de performance de rotas PBN, pois as aeronaves militares não utilizam as rotas previstas para a circulação aérea geral quando em manobra militar.

Com uma análise detalhada de cada dia, foi possível verificar outras duas restrições nos dados que afetavam o desempenho das aeronaves na TMA e no aeródromo. Primeiro, o surgimento do NOTAM B0147/05, no qual inviabilizava a operação na pista 35, e segundo, o início em janeiro de 2005 do RVSM na área continental do Brasil.

A impraticabilidade de pista 35 alterou o comportamento dos tráfegos de pequeno porte no circuito e nas rotas de aproximação e saída. Com a aplicação do RVSM houve alteração nos níveis de voo, velocidade e gradiente de descida/subida das aeronaves. Assim, foram selecionados 12 dias picos referente ao ano de 2005 para dados de entrada no RAMS, os quais apresentavam os mesmos parâmetros a serem simulados durante um período completo de um ano.

Por último, a análise do mix de aeronaves ao longo do dia possibilitou identificar os horários de pico de tráfego no aeródromo e comparar a demanda com a capacidade prática de pista projetada pelo CGNA [55].

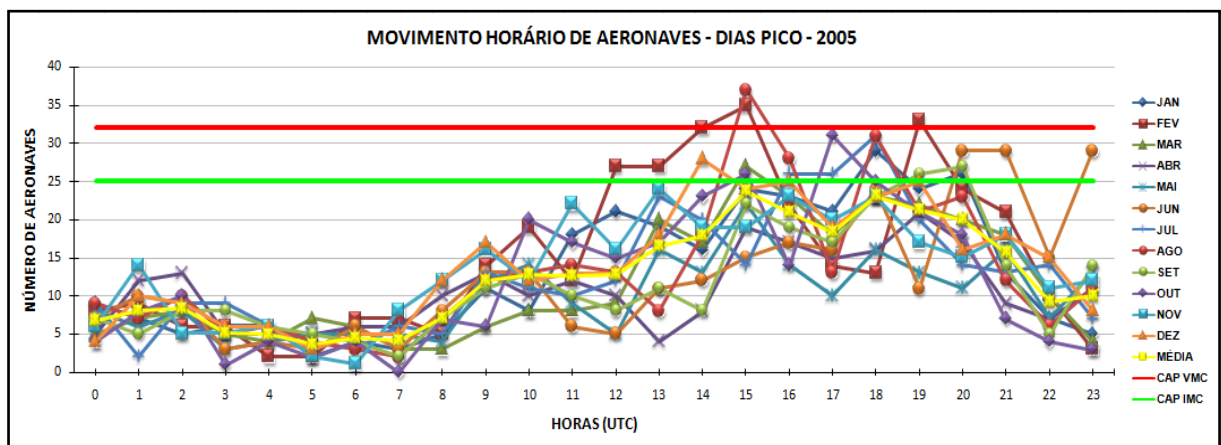


Figura 4.3 – Evolução horária do tráfego aéreo em Salvador (dias-pico/2005).
Fonte: DTCEA-SV [52]

Na figura 4.3 estão representados todos os dias-pico de 2005, cuja quantidade de aeronaves foi calculada e identificada ao longo das 24 horas (horário UTC), possibilitando assim, a visualização das horas-picos.

Durante a madrugada é possível verificar uma maior uniformidade da quantidade de tráfegos, pois as aeronaves da aviação geral (não regular) e militar são praticamente inexistentes, permanecendo apenas os vôos regulares.

Entretanto, a partir das 08:00hs (UTC) há uma maior variação da quantidade em virtude dos vôos não regulares, tendo como as horas-pico os períodos compreendidos entre 14:00 e 16:00hs (UTC) e 18:00 e 20:00hs (UTC).

A linha horizontal vermelha representa a capacidade prática calculada pelo CGNA para períodos de operações sob condições meteorológicas de vôo visual (VMC). Já a linha horizontal verde representa a capacidade prática calculada pelo CGNA para períodos de operações sob condições meteorológicas de vôo por instrumentos (IMC).

Pode-se perceber que a capacidade prática VMC foi ultrapassada, porém por pequenos períodos do dia. Já a capacidade IFR foi ultrapassada em períodos maiores, entretanto, não foi possível precisar as condições meteorológicas reinantes dos dias selecionados e, conseqüentemente, os horários de operação do aeródromo sob as regras IFR ou VFR. Os demais cálculos de capacidade estão no Apêndice C que possibilita confrontar os valores do CGNA com a metodologia da FAA [56].

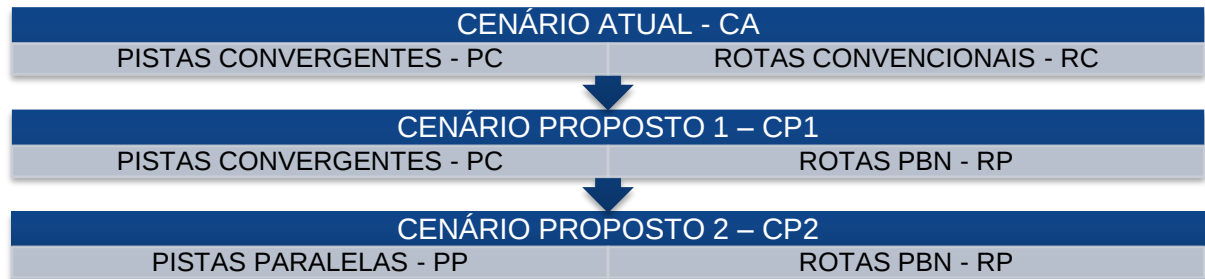
4.3 MODELAGEM DOS CENÁRIOS

Esta etapa do estudo foi dividida em três grandes fases:

- a) Fase de pré-modelagem;
- b) Fase de modelagem do cenário atual;
- c) Fase de modelagem dos cenários propostos.

A fase de pré-modelagem está relacionada às outras duas fases. Nesta fase são coletados todos os dados para a criação do espaço aéreo (cartas aeronáuticas, modelos operacionais dos órgãos de controle, etc.) e são configuradas as funções da ferramenta RAMS PLUS.

As fases de modelagens dos cenários foram estabelecidas em uma sequência de composição de pistas e rotas, conforme abaixo discriminado:



4.3.1 O USO DO RAMS PLUS

Neste estudo é utilizada a ferramenta de simulação *fast-time* RAMS PLUS para a modelagem de cenários de circulação aérea que correspondam às navegações empregadas e às configurações de pistas, atual e futura, do Aeroporto Internacional de Salvador – Deputado Luís Eduardo Magalhães.

Antes da modelagem dos cenários, foi necessário adequar as funções dos componentes do lado aéreo e do lado solo da ferramenta RAMS PLUS às particularidades do espaço aéreo de Salvador. Neste estudo, as funções da ferramenta de simulação foram divididas em 4 classes: Solo, Espaço Aéreo, Aeronave e ATM.

a) Solo:

- I. Pistas: foram utilizados os 3 tipos de conceitos que as caracterizam - tempo de ocupação de pista, “*lock time*” e “*block time*”. O tempo de ocupação de pista (distintos para a decolagem e o pouso) é formado por um conjunto de performance de aeronaves (razões de aceleração e desaceleração) e distribuição estocástica. O *Lock time* é caracterizado pela separação mínima regulamentar exigida (5NM) quando uma aeronave está na aproximação final e o *block time*

é o tempo em que as demais pistas ficam bloqueadas quando se utiliza a pista para pouso/decolagem (importante aspecto em pistas convergentes como a de Salvador);

- II. Pistas de táxi: este estudo se diferencia pelo uso de pistas de táxi intermediárias para que houvesse um maior realismo das operações. Assim, as performance das aeronaves eram ajustadas para a utilização da melhor saída de pista. Não foram aplicadas as restrições de uso de táxi, exceto àquelas que ligavam ao pátio militar, que eram vedadas ao uso de aeronave civil;
- III. *Gates*: foram criados todos os *gates* existentes no aeródromo, entretanto, o seu uso (tempo de ocupação, *push-back*, restrições por envergadura ou companhia aérea) não é o foco deste estudo;
- IV. Auxílios à navegação: foram representados todos os auxílios à navegação que fazem parte da atual rede de rotas. Em cada auxílio foram ajustados os erros de tolerância do equipamento, o que proporcionou uma aleatoriedade do uso da rota ATS.

b) Espaço aéreo:

- I. Rotas ATS: é o parâmetro principal deste estudo. Cada rota dentro do RAMS é estabelecida para cada pista independentemente. Foi necessário solucionar dois aspectos que influenciariam no desempenho das aeronaves e que poderiam distorcer a análise:
 - i. No mundo real, as rotas de saída são geralmente configuradas para servirem mais de uma pista;
 - ii. A curva inicial de uma saída geralmente é estabelecida por altitude, o que ocasiona pontos de curva diferentes, em relação ao solo, para cada categoria de aeronave.

Para resolver esta questão, primeiramente foram criadas saídas independentes para cada pista. Por último, as categorias de aeronaves foram divididas em duas classes: A/B e C/D/E³², conforme estabelecido pela ICAO [12] para algumas fases de procedimentos, e criados dois pontos distintos de curva, um para cada classe. Todas as restrições de altitude e velocidade das rotas foram estabelecidas conforme publicação em vigor.

- II. Setorização e Áreas de controle: em cada setor ou área de controle foram retratados os limites laterais e verticais, bem como as separações empregadas pelos órgãos de controle. Assim, para a área do ACC-RE a separação empregada foi de 10NM e a do APP-SV de 5NM. Neste caso, também houve a necessidade de ajuste para que fossem representadas as separações dos vãos VFR nos corredores visuais e no circuito de tráfego. Foi criado então um setor denominado “VFR” com separação de 1NM.
- III. Esperas em vôo: foi possível calibrar todas as órbitas de espera contidas nos procedimentos de chegada. Com isto, pode-se ajustar o tamanho da espera em função do nível de vôo e velocidade das aeronaves.
- IV. Tempo: todas as horas inseridas no sistema foram referenciadas no Tempo Universal Coordenado (UTC), no qual esta baseado todo o sistema de tráfego aéreo mundial.

c) Aeronave:

- I. Performance: sofreram ajustes para se adequar a realidade de Salvador. As principais calibrações foram as razões de descida e as velocidades. As razões de descida foram adaptadas para que as aeronaves pudessem cumprir os

³² As categorias de aeronaves para procedimentos de navegação aérea é um agrupamento de aeronaves com características semelhantes, na qual são estabelecidas pela velocidade de stol (perda de sustentação) multiplicada pelo fator 1,3, na configuração mais crítica para pouso.

gradientes exigidos e as restrições de altitude impostas em cada segmento das rotas de chegada. O ajuste de velocidade é feito por faixas de altitudes de vôo. A maioria das aeronaves apresentava no *default* do programa uma velocidade muito alta na aproximação final;

- II. Geração de tráfego: foi permitido simular o dinamismo do tráfego na TMA conforme os dados reais, tais como mudanças de pista em uso determinadas pela TWR ou manobras de toque-e-arremetida.

d) ATM

- I. Carga de Trabalho dos Controladores: apesar de não ser escopo deste trabalho, estas funções estão diretamente ligadas à complexidade aérea analisada. As tarefas foram formuladas com base no estudo de Pogianelo [20], que apresentava as mesmas características de espaço aéreo (TMA no sistema “passo-a-passo”) e de console radar (AMC901). Apenas alguns ajustes diferenciados foram feitos para atender funções específicas do APP-SV, tais como o serviço prestado nos corredores visuais da TMA e coordenação automática entre TWR/APP;
- II. Pontos de Had-off: cada ponto de transferência de controle entre os órgãos operacionais (ACC/APP e APP/TWR) foram devidamente ajustados em função de tempo, distância e altitude. Estas funções também influenciam diretamente na complexidade do espaço aéreo;
- III. Complexidade do espaço aéreo: o modelo proposto pela NASA e adotado pelo EUROCONTROL e FAA, que é discutido no Capítulo 5, já é incorporado na ferramenta. Apenas alguns ajustes das áreas de borda setoriais tiveram que ser realizados para atender a realidade brasileira. Todos os parâmetros de complexidade e seus respectivos coeficientes não foram alterados;

- IV. Resolução de conflito: outro fator importante deste estudo, e que até então não havia sido explorado em simulações *fast-time* no Brasil com o RAMS, foi a aplicação dos parâmetros de detecção e resolução de conflitos. Esta função está limitada a capacidade do sistema em resolver os conflitos entre pares de aeronaves. Cada aeronave é comparada com todas as outras ativas no sistema, ocasionando para uma mesma aeronave vários conflitos ao longo da rota.

A calibração é feita listando todas as funções de resolução em ordem de prioridade. Para este estudo foram levados em consideração alguns parâmetros determinados pelo DECEA [43] e [57], tanto para separação como para controle de fluxo, tais como: ajustes de velocidade, mudanças de nível e esperas em vôo. Não foi utilizada a vetoração de tráfego como medida de resolução de conflito devido ao tempo de simulação. Para cada vetoração de aeronave é necessário que o modelador informe todo procedimento (rumo, altitude, distância) o que inviabiliza simulações em um cenário com grande número de aeronaves.

4.3.2 CENÁRIO ATUAL (CA)

Neste cenário, foi modelada tanto a rede de rotas ATS convencionais (RC) como a configuração de pistas convergentes (PC) no Aeroporto Internacional, de modo que retratassem os principais elementos aeroportuários do lado ar e os elementos do espaço aéreo.

Todas as rotas ATS (STAR, SID, REA, VAC e os segmentos finais do IAP) existentes na localidade foram modeladas. Devido aos problemas apresentados de modelagem com o uso da ferramenta, o número de rotas de saída, corredores visuais e circuito de tráfego foram os

fatores que demandaram maior número de horas de construção. Totalizaram assim, 5 STAR, 57 SID, 10 REA, 6 VAC (Figuras 4.4 e 4.5).

É possível identificar os inúmeros pontos de conflito dentro e fora dos limites da TMA. Os principais conflitos estão relacionados às interseções de rotas de chegada com as rotas de saída. Alguns destes pontos são configurados em forma de “janela” de restrição. As aeronaves que chegam devem obrigatoriamente passar em um ponto com limite de altitude superior e inferior. Neste mesmo ponto, as aeronaves que saem devem, obrigatoriamente, passar acima ou abaixo da “janela” de restrição.

Assim, o controlador não tem conhecimento antecipado de qual a intenção do piloto para cumprir aquela restrição. Estas incertezas acarretam no aumento no número de comunicações e, conseqüentemente, na carga de trabalho do controlador, além do risco em uma falha de comunicações.

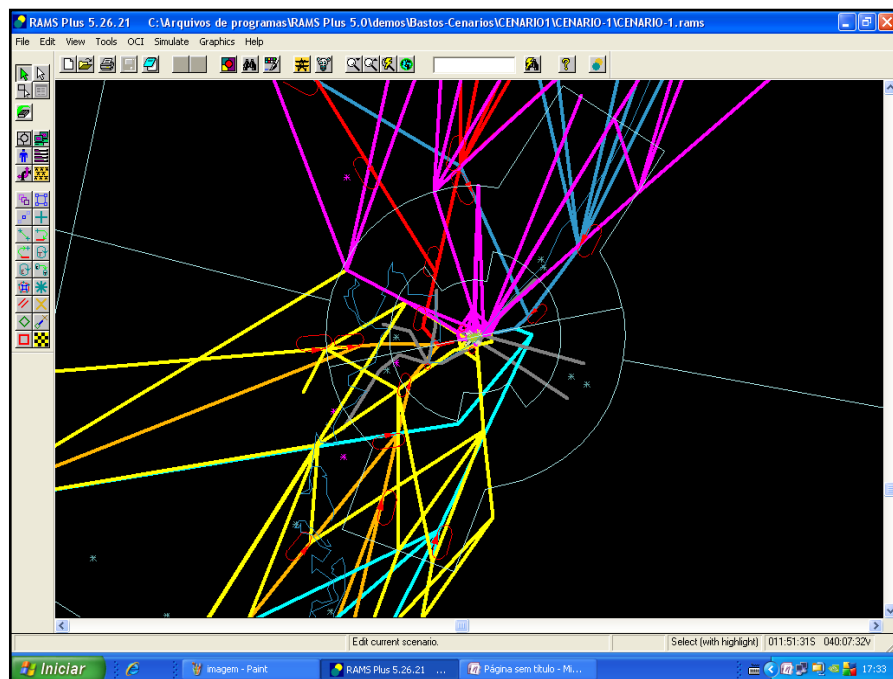


Figura 4.4 – Cenário Atual – modelagem do espaço aéreo.

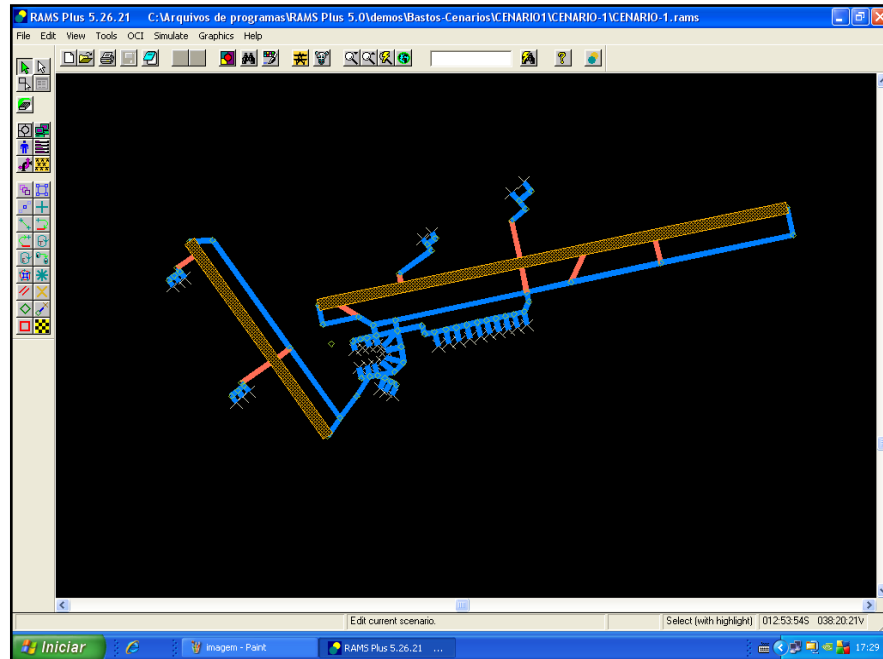


Figura 4.5 – Cenário Atual – modelagem do lado aéreo do aeroporto.

4.3.2.a VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a etapa de verificação do cenário atual, foram desenvolvidas as Fichas de Verificação tanto para modelo conceitual (parâmetros estáticos) como modelo operacional (parâmetros dinâmicos).

Esta fase é importante para que nenhuma calibração deixe de ser feita, assim, estas fichas foram criadas com o objetivo de representar um “*check list*” dos parâmetros a serem simulados, contendo o dia e hora da simulação, além do *status* e observações destes parâmetros.

As verificações aconteceram com base nos *outputs* gerados pelo RAMS e pela visualização da operação. A velocidade nesta fase de modelagem foi reduzida em diversas escalas, inclusive em tempo real e em tempo retardado, para que se pudesse analisar requisitos de performance das aeronaves.

Após as fases de verificação conceitual e operacional em sede, passou-se a fase de validação nas localidades de Salvador e Recife. Esta etapa foi estabelecida com a adoção do critério de entrevista com painel de especialistas e revisualização radar.

Neste estudo de caso, devido às dificuldades de armazenamento de dados radar, foi adotada a validação por meio de revisualização radar do dia 14 de setembro de 2006. Na localidade de Salvador há dois tipos de radares implantados: radar de terminal (TA10-M) e radar de rota (LP-23).

Com a pane no sistema de gravação do radar de terminal em Salvador no período selecionado, somente foi possível a revisualização do radar de rota, obtida por meio de gravação na sede do CINDACTA III em Recife, que possui algumas restrições em área terminal, dentre elas o tempo de atualização de dados menor do que o radar de TMA.

Foram montados 4 painéis de especialistas, sendo 3 no próprio DTCEA-SV e 1 na sede do CINDACTA III, na qual os órgãos de controle de Salvador são subordinados técnica e operacionalmente. Os painéis de especialistas da localidade de Salvador foram estabelecidos com efetivo da TWR (1 painel) e do APP (2 painéis), contendo 1 supervisor, 1 instrutor e 2 controladores, com distintos períodos de tempo de experiência na localidade e de profissão.

O painel de especialistas do CINDACTA III foi formado exclusivamente por 3 instrutores, responsáveis pela formação de controladores no Instituto do Controle do Espaço Aéreo (ICEA).

O critério de formação dos painéis de especialistas de Salvador foi estabelecido para que as informações não fossem deturpadas por inexperiência, vícios por grande período de permanência na localidade, desatualização com as normas em vigor, entre outros. Por último, o painel de especialistas da sede do CINDACTA III, foi estabelecido com a finalidade de

detectar erros de gerenciamento e controle de tráfego aéreo de Salvador e que não foram detectados pelos integrantes das equipes da TWR/APP.

Durante a fase de validação em Salvador, foram constatados alguns parâmetros que necessitaram de nova calibração, dentre elas a velocidade de descida dentro da TMA, os níveis de descida na final e a separação empregada nos corredores visuais. Tais calibrações só foram possíveis de serem realizadas em sede (ITA), de posse da ferramenta RAMS PLUS.

Também foram constatados comportamentos do tráfego que não correspondem com o modelo padrão. Durante a revisualização em Recife, algumas aeronaves foram observadas realizando procedimento de espera na aproximação final, assim como aeronaves de companhia aérea regular realizando vôo panorâmico no litoral e alguns procedimentos de aproximação perdida.

Como não havia registro destas ocorrências e nem a gravação de áudio que pudesse verificar o real motivo destes procedimentos fora do padrão, em consenso com especialistas do controle de tráfego aéreo, estes comportamentos esporádicos não foram modelados.

4.3.3 CENÁRIO PROPOSTO 1 (CP1)

Neste cenário é modelada a atual configuração de pistas convergentes (PC) e a introdução de rotas PBN (RP). Para a modelagem do cenário 2 e 3 foram seguidos os critérios de elaboração de procedimentos estabelecidos pela ICAO [12] e FAA [25] (Apêndice D). Também foi inserido o conceito de circulação aérea citado no Capítulo 2.

Foram criadas 3 regiões de chegada denominadas NE, NW e SW e 4 regiões de saída, denominadas NE, N, W e S. Cada região de chegada foi estabelecida com duas rotas para a entrada na TMA a fim de dividir o volume de tráfego para o ACC-RE, e cada par de rota de

chegada no setor de alimentação convergia em um único ponto para entrada no setor Final (Figura 4.6).

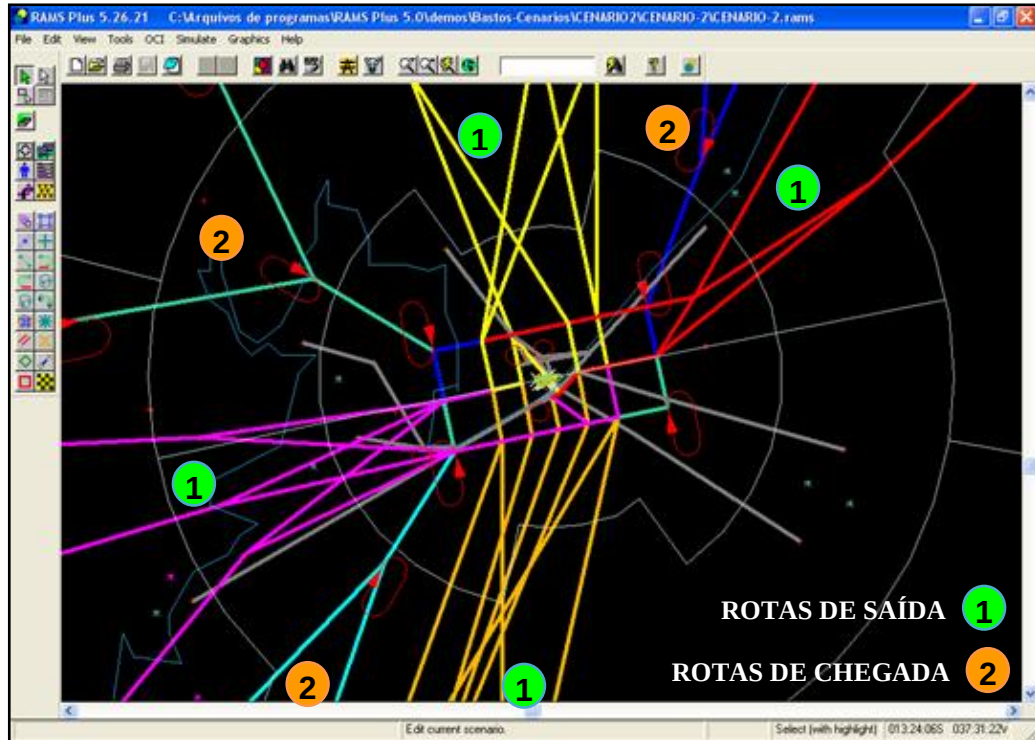


Figura 4.6 – Cenário Proposto 1 – modelagem das saídas e chegadas.

Com esta configuração pode-se separar na região SW, ainda na área do ACC, o volume de tráfego proveniente do Rio de Janeiro e de São Paulo, assim como o volume da região NE proveniente de Fortaleza e Recife (ambas as rotas possuem tráfegos provenientes da Europa). Atualmente, estes volumes de tráfego estão concentrados, dificultando o gerenciamento e a coordenação do tráfego aéreo entre ACC/APP.

4.3.3.a MODELAGEM DE ROTAS PBN PARA PISTAS CONVERGENTES

Durante a pesquisa, as rotas concebidas conforme o conceito PBN foram calculadas segundo os critérios da ICAO [1] e [12] (Anexo D) e estabelecidas com base em cartas topográficas,

confeccionadas pelo Instituto de Cartografia Aeronáutica (ICA), visto que a ferramenta RAMS não possui nenhuma interface com banco de dados de obstáculos.

Para a elaboração dos desenhos foram utilizadas as Cartas de Pilotagem da região, na escala de 1:250.000 e a ferramenta de desenho computacional AutoCAD 2008, pois a ferramenta RAMS não possui funções adequadas de desenho. Todas as rotas calculadas foram inseridas manualmente no RAMS, pois tal ferramenta não permitiu a importação de dados CAD (extensões dwg e dxf).

Em relação aos pontos de conflito encontrados na rede de rotas convencionais, a elaboração de rotas PBN procurou estabelecer pontos de restrição com um único limite, superior ou inferior. Um exemplo são as restrições nos segmentos de saída e chegada próximos a pista.

As aeronaves que chegam, quando ingressam no segmento paralelo a pista, são restritas a uma altitude mínima na descida para permitir que as aeronaves que decolam cruzem por baixo deste segmento restritas a uma altitude máxima de subida. Se houver falha de comunicações, o cruzamento ocorrerá sem conflito.

4.3.3.b VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Segundo Phillips [28], Balci [33] e Rao et al [34], somente podem ser validados os modelos que existem no mundo real. Entretanto, esta pesquisa estabeleceu um processo para a validação do modelo de rotas e circulação.

Foi formado um painel de especialistas em elaboração de procedimentos, pertencentes ao DECEA, para a avaliação dos cenários propostos. A validação tinha por objetivo apenas a elaboração de rotas PBN e a circulação em TMA, visto que os demais parâmetros permaneciam inalterados.

Foram verificados elementos como gradientes de descida, restrições de altitude e velocidade, mínimos de separação de obstáculos, ângulos de curva em cada segmento e áreas de proteção das rotas.

4.3.4 CENÁRIO PROPOSTO 2 (CP2)

Neste cenário as rotas de navegação PBN (RP) foram configuradas conforme os critérios estabelecidos do cenário 2, entretanto, foi concebida com vistas a uma possível configuração de pistas paralelas (PP) no Aeroporto Internacional, de acordo com projeto de implantação (Figuras 4.7 e 4.8).

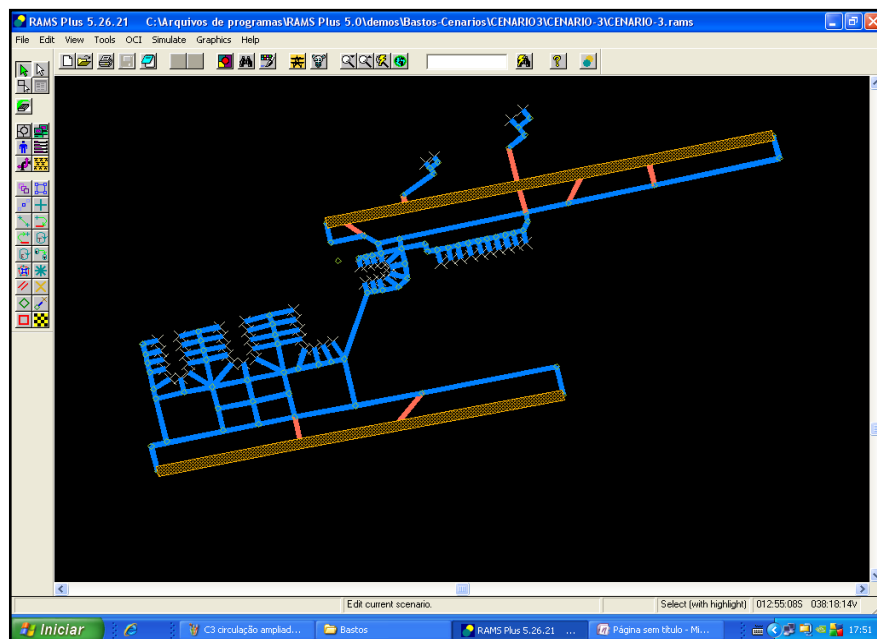


Figura 4.7 – Cenário Proposto 2 – modelagem do lado aéreo.

Para a utilização mais eficiente das operações de pouso e decolagem, foi estabelecido:

- a) decolagens: RWY10L e RWY28L;
- b) pousos: RWY10R e RWY28R.

Entretanto, nesta fase, a construção do modelo permitiu a simulação de aproximações e decolagem independentes do aeródromo, a fim de possibilitar um gerenciamento de tráfego mais eficiente, visto que a separação entre as pistas de 1300m é superior à recomendada pela ICAO de 1035m.

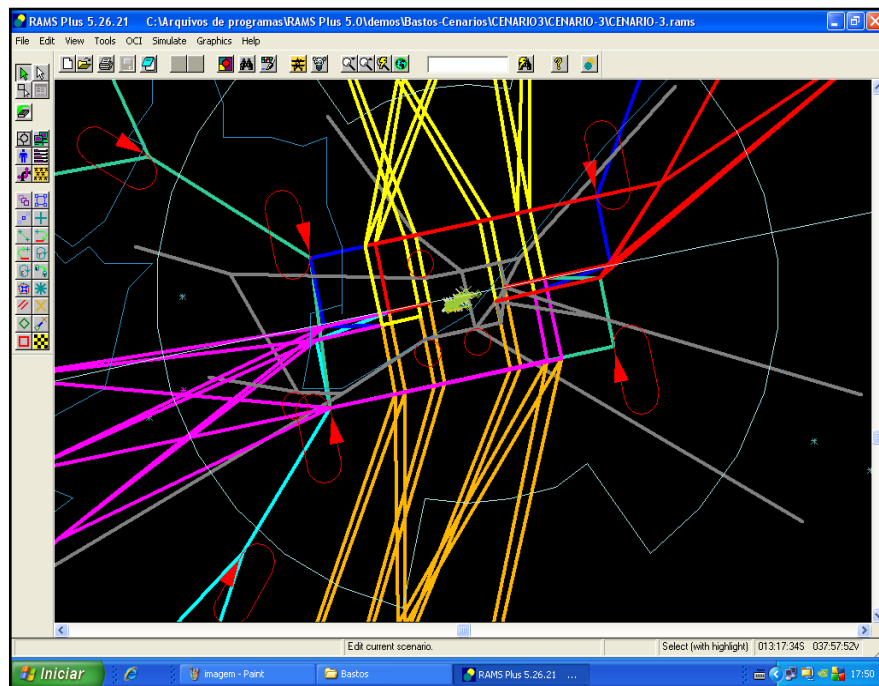


Figura 4.8 – Cenário Proposto 2 – modelagem das saídas e chegadas.

4.3.4.a MODELAGEM DE ROTAS PBN PARA PISTAS PARALELAS

As rotas para este cenários seguiram os mesmo parâmetros apresentados no cenário proposto 1. Os fixos de entrada e saída permaneceram inalterados. As grandes mudanças aconteceram no setor final.

Os procedimentos de aproximação final foram concebidos de forma que, qualquer que fosse o setor de entrada, as aeronaves poderiam prosseguir para o pouso para a pista que apresentasse melhor configuração em relação ao volume de tráfego no sistema.

Da mesma forma, foram concebidas saídas paralelas mantendo dois pontos de curva para cada procedimento, um para cada classe de categoria. Assim, a simulação pode utilizar para as saídas a melhor pista de decolagem em função da quantidade de tráfegos de decolagem.

Portanto, nos períodos em que não havia tráfego com prioridade de decolagem, a simulação otimizava as chegadas com a utilização de aproximações paralelas simultâneas. Da mesma forma, quando não havia tráfegos para pouso, a simulação otimizava as saídas com decolagens paralelas simultâneas.

4.3.4.b VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Assim como no modelo proposto 1, a verificação e validação ocorreu com a formação do painel de especialistas em procedimentos de navegação aérea. O aspecto de maior atenção para a verificação dos parâmetros foi o gerenciamento pelo RAMS para a alocação de pista para as aeronaves, tanto para pouso como para decolagem.

5 ANÁLISE E RESULTADOS

A análise dos resultados foi estabelecida pela adoção de métrica de tempo e distância de vôo, resolução de conflitos, complexidade do espaço aéreo e tempo de atraso na decolagem. A simulação foi gerada em um computador Pentium IV, 3.0 GHz e 3 Gb de memória RAM.

Foram simulados 36 cenários, ou seja, 12 dias-pico que representam os maiores movimentos dos meses de 2005 simulados nos 3 cenários (atual e dois propostos), totalizando 10.716 movimentos de aeronaves e 892:58:06 horas reais em 8:46:46 de simulação, perfazendo 101,71 vezes, em média, mais rápido que o tempo real (Anexo VIII).

Em todas as métricas pode-se perceber, que devido ao dinamismo existente no tráfego aéreo e respectivos atributos, tais como: variação do número e mix de aeronaves, variação do tempo de entrada e saída do sistema, variação da rota voada, variação da quantidade de tráfego dentro do setor, há uma variação muito grande nos resultados ao longo do período de um ano.

Entretanto, partindo do princípio que, entre simulações, em um mesmo dia-pico, não há alteração destes atributos, pode-se realizar comparações mês a mês e confrontar os 3 cenários, visto que a única variável entre eles são as rotas ATS, objeto de estudo desta pesquisa. Na análise chamaremos o cenário atual de CA, o cenário proposto 1 de CP1 e o cenário proposto 2 de CP2. O Anexo IX apresenta os resultados numéricos totais.

5.1 TEMPO DE VÔO

Com os resultados obtidos do tempo total voado (Figura 5.1) podemos perceber que, comparando CA a CP1 e a CP2, as aeronaves possuíram, em média, um gasto de tempo a

mais de 10,33% em relação a CP1 e 11,54% em relação a CP2. Comparando o mesmo resultado entre CP1 e CP2, percebemos que CP1 possuiu, em média, um gasto a mais de apenas 1,09%, visto que as rotas são praticamente coincidentes, exceto próximo ao circuito de tráfego.

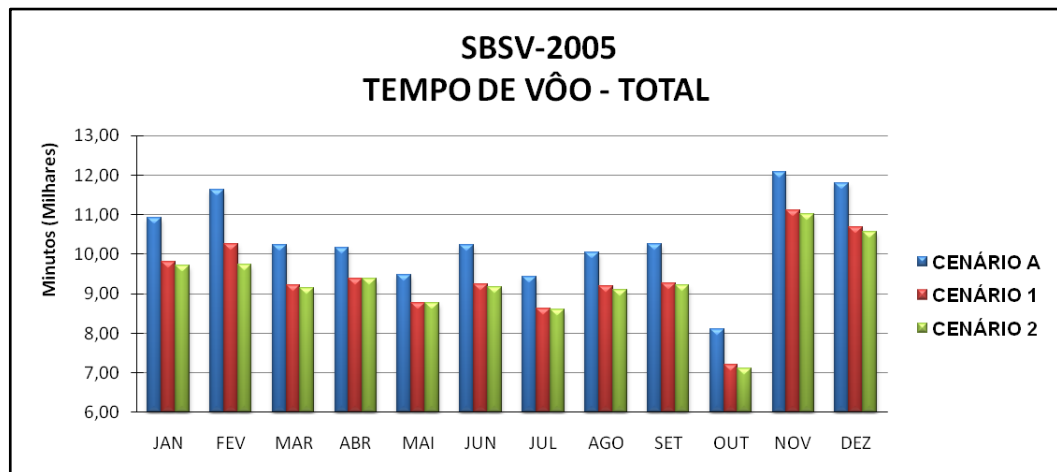


Figura 5.1 – Tempo total de vôo.

Na literatura são abordadas algumas análises de distâncias e tempo de vôo de decolagens separadamente das chegadas. Fazendo uma nova análise, apenas com as saídas, (Figura 5.2) percebemos que CP2 apresenta em média um gasto de 0,92% a mais que CP1.

Isto se dá pelo fato que, quando houve a mudança para pistas paralelas, as aeronaves de pequeno porte que partiam de Salvador em direção ao setor SW (Itaparica e Morro de São Paulo) no CP2 percorriam uma rota maior que no CP1 e, conseqüentemente, permaneciam maior tempo em vôo do que decolando anteriormente da pista 17.

A mesma situação se inverte quando analisamos as rotas de chegada. Com a configuração de pistas convergentes, as aeronaves procedentes do setor SW necessitavam cruzar o campo, enquanto em CP2 a aproximação era praticamente direta. CP1, então, apresentou em média um gasto de 2,97% maior em relação a CP2 (Figura 5.3).

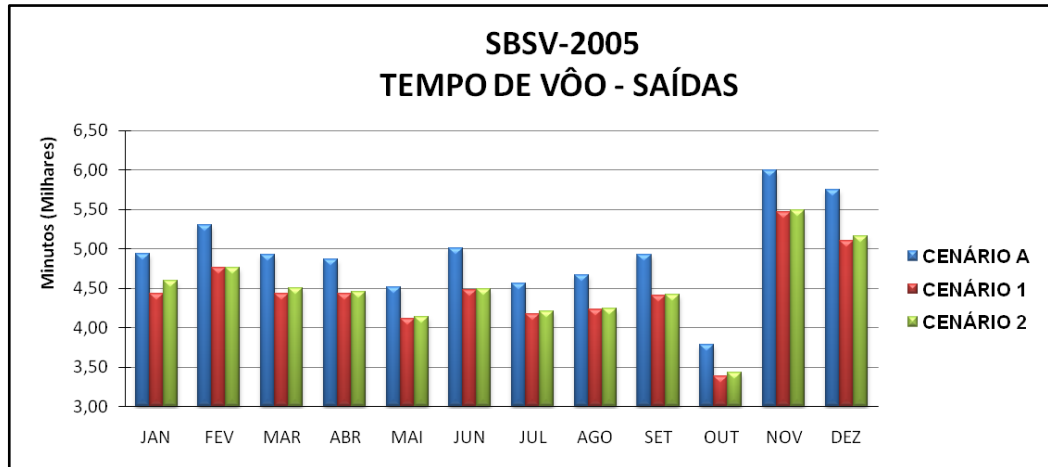


Figura 5.2 – Tempo de vôo – saída.

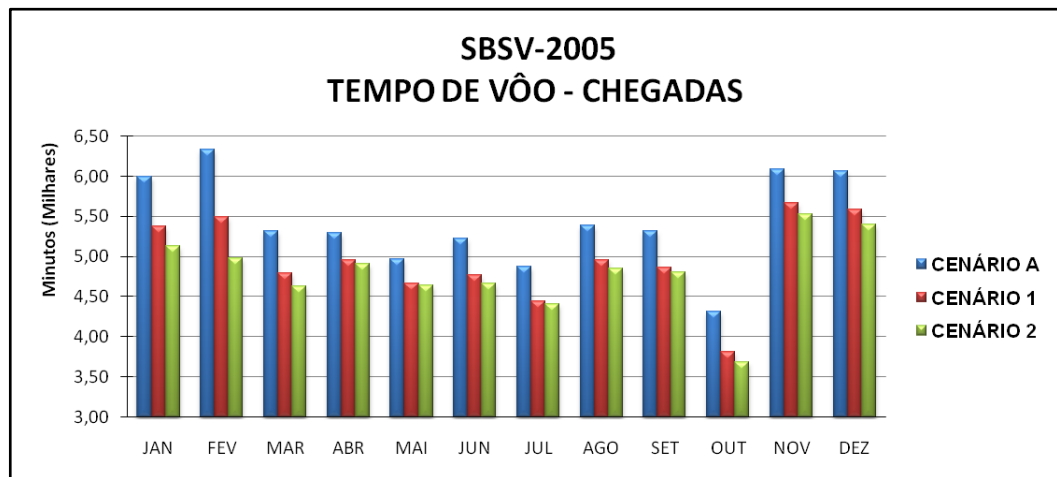


Figura 5.3 – Tempo de vôo – chegadas.

5.2 DISTÂNCIA DE VÔO

Assim como no tempo de vôo, há uma variação das distâncias voadas ao longo dos meses, em função das rotas e origem/destino dos tráfegos. Além disso, há uma variação em relação ao tempo de vôo, pelo fato que ao longo do ano há um mix de aeronaves de pequeno porte efetuando etapas longas e curtas não regulares, assim como aeronaves de médio porte efetuando etapas longas e algumas etapas curtas (Ex. aeronave C-130 efetuando vôo de manobra na TMA).

Temos, em média, o total da distância no CA de 8,16% a mais que no CP1 e de 8,65% a mais que no CP2. CP1 possuiu, em média, 0,44% a mais que CP2 (Figura 5.4). Novamente quando fazemos a separação de saídas e chegadas, encontramos no CP1 1,65%, em média, a mais que no CP2 nas chegadas e as saídas no CP2 possuíam, em média, 0,82% a mais que no CP1 (Figuras 5.5 e 5.6).

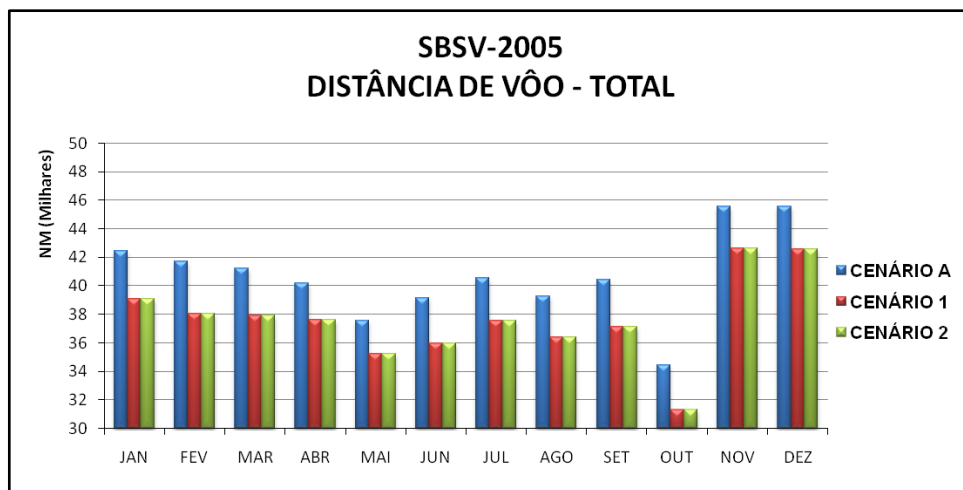


Figura 5.4 – Distância de vôo – total.

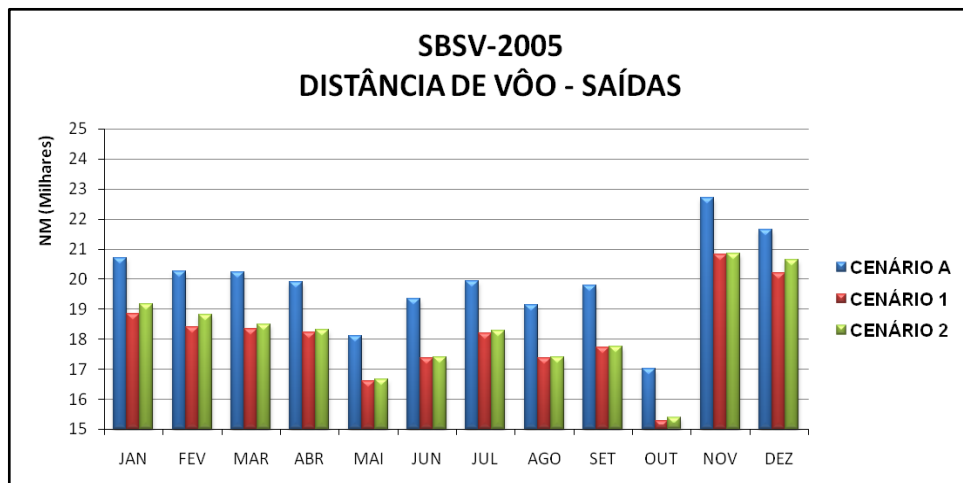


Figura 5.5 – Distância de vôo – saídas.

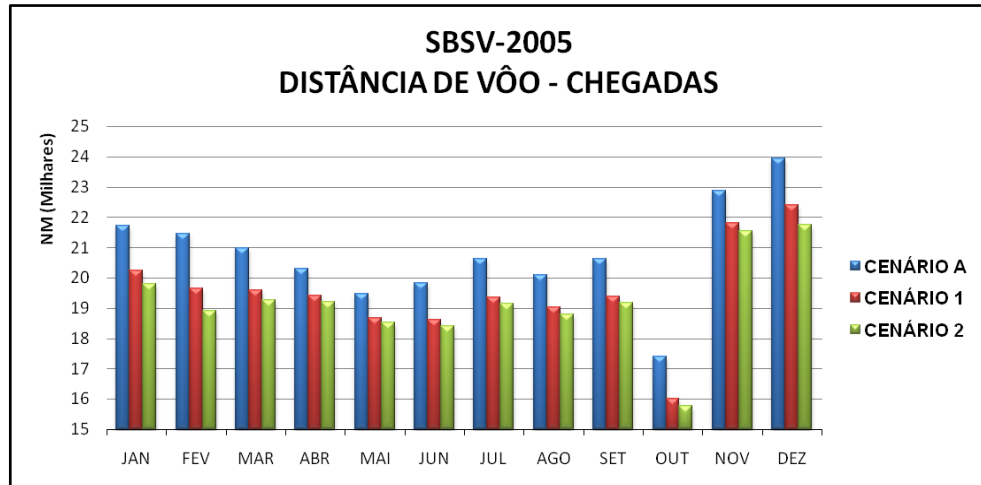


Figura 5.6 – Distância de vôo – chegadas.

5.3 RESOLUÇÃO DE CONFLITOS

Quando analisamos as resoluções de conflitos, percebemos que nem sempre quando há uma elevação do número de aeronaves, há um aumento de conflitos. Esta constatação é em função do comportamento do tráfego aéreo na TMA e de como se apresentam os tráfegos no sistema, além do número de tráfego dentro do setor.

Pela Figura 5.7 percebemos que nos meses de alta temporada, janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, e nos meses julho e agosto, com altos índices de manobra militar, há uma quantidade maior de aeronaves ao longo do litoral e, conseqüentemente, no circuito de tráfego, ocasionando um número elevado de conflitos.

Em contrapartida, no mês de junho o número total de aeronaves aumenta, entretanto o número de aeronaves no litoral, neste período, diminui em função das chuvas no litoral nordestino e, conseqüentemente, os conflitos diminuem. Não houve como coletar dados de um eficiente gerenciamento do fluxo aéreo na terminal nesta análise que pudesse assegurar a diminuição de conflitos, como no mês de Abril.

Por vezes, o número de conflitos é maior que o número de aeronaves (CA). Isto ocorre pelo fato que cada conflito é detectado e resolvido entre pares de aeronaves. Assim, uma mesma aeronave poderá ter mais de um conflito gerado ao longo de uma aproximação ou saída.

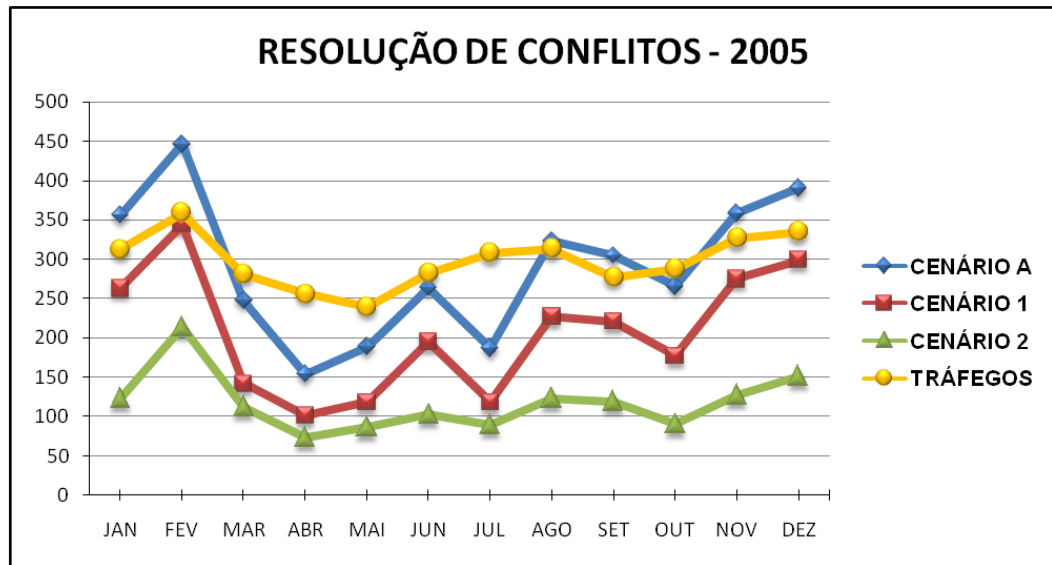


Figura 5.7 – Resolução de conflitos.

Fazendo uma comparação relativa entre CA e os demais cenários, observamos que CA, em média, apresentou maior número de conflitos que CP1 e CP2, aproximadamente 40,56% e 147,23%, respectivamente. CP1 teve em média 75,88% a mais que CP2.

5.4 COMPLEXIDADE DO ESPAÇO AÉREO

Níveis de complexidade do espaço aéreo têm relevante papel nos atuais estudos de tráfego aéreo. Segundo Sridhar et al [59], tal complexidade depende das características estruturais e de fluxo do tráfego aéreo relacionados a atributos de número e mix de aeronaves, separações empregadas, parâmetros físicos e espaciais dos setores de controle, dentre outros.

Segundo a NASA [60], para garantir a segurança de sistemas complexos ATM futuros é necessário conhecer o impacto causado nos operadores, resultante das mudanças nos

procedimentos. Este conhecimento irá permitir o desenvolvimento de procedimentos que trarão benefícios ao sistema, em termos de segurança e de custos, sem a necessidade de utilização de RTS.

O estudo da complexidade de um setor do espaço aéreo é uma ferramenta de avaliação dos padrões atuais e futuros de tráfego aéreo, que possibilita identificar estratégias de melhoria dentro de um mesmo cenário, tais como: mudanças de limite setorial, redução de conflitos e alteração de procedimentos e de perfis de vôo das aeronaves.

Esta pesquisa adota como métrica o modelo de complexidade da NASA [60], inserido na ferramenta RAMS PLUS e amplamente empregado pela FAA e EUROCONTROL em cenários de implementação de conceitos futuros.

O algoritmo desenvolvido pela NASA define a complexidade de um setor do espaço aéreo. A complexidade total é a soma ponderada da contribuição individual dos fatores de complexidade. Cada um destes fatores contribui para a complexidade total com um valor máximo (MAX), computado entre o tempo n e o tempo $n+m$, ou com uma soma (SUM) neste mesmo o intervalo de tempo. Assim, os fatores de complexidade são descritos pelas seguintes expressões:

$$0.0172 \times \text{MAX}(\text{ACT}(n), \dots, \text{ACT}(n+m)) \quad (1)$$

$$0.328 \times \text{MAX}(\text{DNS}(n), \dots, \text{DNS}(n+m)) \quad (2)$$

$$0.0498 \times \text{SUM}(\text{CPA}(n), \dots, \text{CPA}(n+m)) \quad (3)$$

$$0.1070 \times \text{SUM}(\text{ANG}(n), \dots, \text{ANG}(n+m)) \quad (4)$$

$$0.0426 \times \text{SUM}(\text{NBR}(n), \dots, \text{NBR}(n+m)) \quad (5)$$

$$0.0754 \times \text{SUM}(\text{PRX-C}(n), \dots, \text{PRX-C}(n+m)) \quad (6)$$

$$0.1134 \times \text{SUM}(\text{CoD}(n), \dots, \text{CoD}(n+m)) \quad (7)$$

$$0.0709 \times \text{MAX}(\text{VDF}(n), \dots, \text{VDF}(n+m)) \quad (8)$$

$$0.0 \times \text{MAX}(\text{VAS}(n), \dots, \text{VAS}(n+m)) \quad (9)$$

$$0.2 \times \text{SUM}(\text{PRX}(n), \dots, \text{PRX}(n+m)) \quad (10)$$

$$0.0676 \times \text{MAX}(\text{STR}(n), \dots, \text{STR}(n+m)) \quad (11)$$

$$0.2564 \times \text{MAX}(\text{INT}(n), \dots, \text{INT}(n+m)) \quad (12)$$

Onde:

(n) é o instante inicial da simulação, e (n + m), o instante final.

(1) Quantidade de Aeronaves (ACT) – quantidade de aeronaves dentro dos limites laterais e verticais do setor em um instante de tempo;

(2) Densidade de Aeronaves (DNS) – quantidade de aeronaves dividida pelo volume do espaço aéreo do setor;

(3) Pontos de Aproximação entre Aeronaves (CPA) – estimativa de perdas potenciais de separações entre pares de aeronaves, que implica em uma maior atenção por parte do controlador de tráfego aéreo para estas aeronaves;

(4) Ângulos de Convergência (ANG) – nível de severidade de cada conflito baseada em sua geometria;

(5) Aeronaves nas Vizinhanças de Conflitos (NBR) – quantidade de aeronaves nas proximidades de uma área de ocorrência de potenciais conflitos. Calcula o nível de flexibilidade de um controlador para a resolução do conflito;

(6) Conflitos Próximos dos Limites Setoriais (PRC) – número estimado de conflitos que podem ocorrer dentro de uma distância além dos limites de um setor;

(7) Descidas ou Subidas (CoD) – quantidade de aeronaves em subida ou descida, em um instante de tempo;

(8) Variação nas Direções dos Vôos (VDF) – medida de variabilidade de proa de todas as aeronaves que estão no setor, em um mesmo instante de tempo, calculada entre pares de aeronaves;

(9) Variação na Velocidade da Aeronave (VAS) – medida de variabilidade da velocidade em relação ao solo (*ground speed*) de todas as aeronaves dentro do setor, em um instante de tempo.

(10) Proximidade de Aeronaves dos Limites Setoriais (PRX) – quantidade de aeronaves dentro de uma distância além dos limites do setor, em um instante de tempo;

(11) Estrutura do Espaço Aéreo (STR) – medida de conformidade do fluxo do tráfego voando através de um setor e a geometria deste;

(12) Conhecimento das Intenções das Aeronaves (INT) – nível de informação sobre a intenção de vôo das aeronaves. Muito utilizado em espaços aéreos onde ocorrem “*free flight*”.

As equações (9) e (12) não são adotadas pelo RAMS. A função (9), apesar de possuir coeficiente igual a zero, foi considerada pela NASA como um fator existente, porém sua contribuição não foi totalmente explicada. A função (12) diz respeito ao “*free flight*”, que até a presente data não havia sido aplicado em áreas continentais.

Para este estudo, foram analisados 5 setores: Setores 4 e 5 (ACC-RE), Alimentadores Norte e Sul e Final (APP-SV). Os setores 7 e 8 do ACC não foram analisados devido a pequena parcela de contribuição nas rotas ATS, onde as aeronaves permaneciam niveladas e não havia conflitos ou mudanças de proa.

O Setor VFR não foi utilizado porque apresenta um maior número de aeronaves no circuito de tráfego sem prioridade para pouso em relação aos demais vôos IFR. Conseqüentemente, em

virtude das esperas, há uma grande variação de proa e um grande número de aeronaves no mesmo setor. Tais amostras distorceriam os resultados.

Os valores de complexidade encontrados utilizando o modelo da NASA são relativos, ou seja, servem de comparação entre cenários. Os cenários apresentam apenas diferenciação entre si na composição das rotas ATS, que estão diretamente relacionadas ao fluxo e perfis de vôo das aeronaves. Fatores como quantidade de aeronaves no sistema e limites setoriais não foram alterados.

Desta forma, foi possível realizar a comparação entre o cenário atual e os cenários propostos, 1 e 2, verificando a complexidade do espaço aéreo com a introdução de rotas PBN.

Os cenários foram montados com esperas nos setores de alimentação do APP ou do ACC, portanto as medidas de resolução empregadas utilizavam estas esperas para separação de tráfego, contribuindo para um maior nível de variação de proa e complexidade (Figuras 5.8 a 5.11). Já o setor final se apresentou mais homogêneo, visto que a complexidade pouco difere entre os cenários em termos de resolução de conflitos (Figura 5.12).

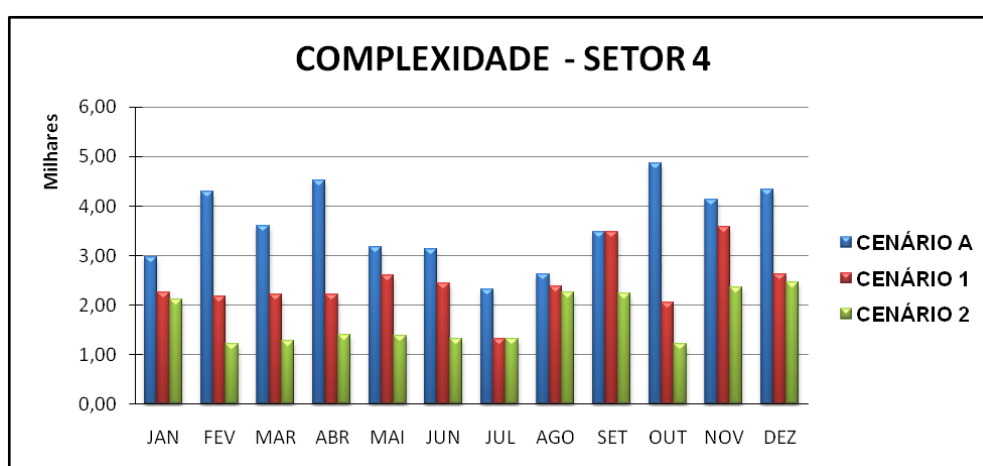


Figura 5.8 – Complexidade do setor 4.

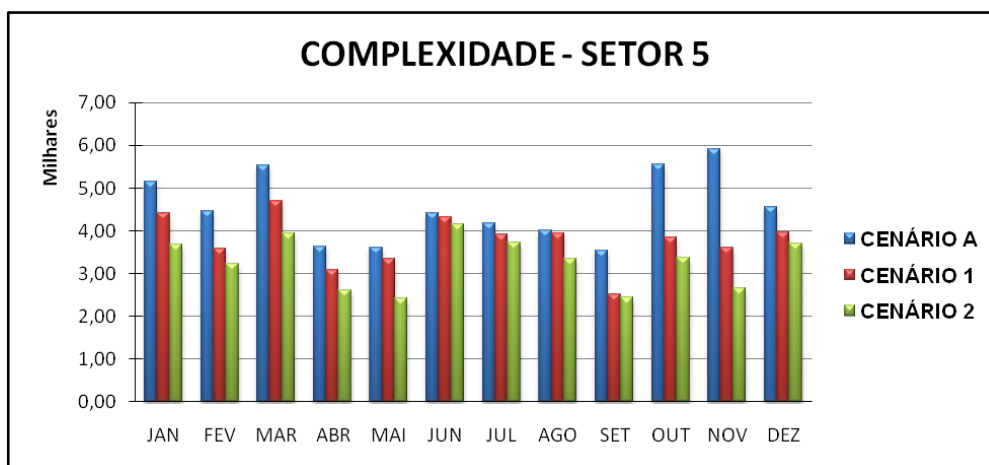


Figura 5.9 – Complexidade do setor 5.

Em relação aos setores do ACC-RE (setores 4 e 5) houve uma grande variação relativa nas complexidade. No setor 4, comparando CA a CP1 e a CP2, foi observado em média uma maior complexidade em CA, de 53,92% em relação a CP1, e de 130,05%, em relação a CP2. CP1 foi 48,22%, em média, mais complexo que CP2.

No setor 5, a complexidade relativa entre os cenários foi menor, entretanto, CA ainda permaneceu mais complexo. Em média, 21,55% a mais que CP1 e 41,65% a mais que CP2. CP1 teve uma complexidade de 16,12% maior que CP2.

Nos setores alimentadores do APP-SV (Norte e Sul), CP1 ainda permaneceu mais complexo que CP2. No setor Alimentador Norte, CA foi mais complexo, em média, 21,63% em relação a CP1 e 47,17% em relação a CP2. CP1 foi mais complexo que CP2 em aproximadamente 21,05%.

No setor Alimentador Sul, CA apresentou maior complexidade em relação a CP1 e a CP2, aproximadamente 26,59% e 48,06%, respectivamente. CP1 foi 19,93% mais complexo que CP2.

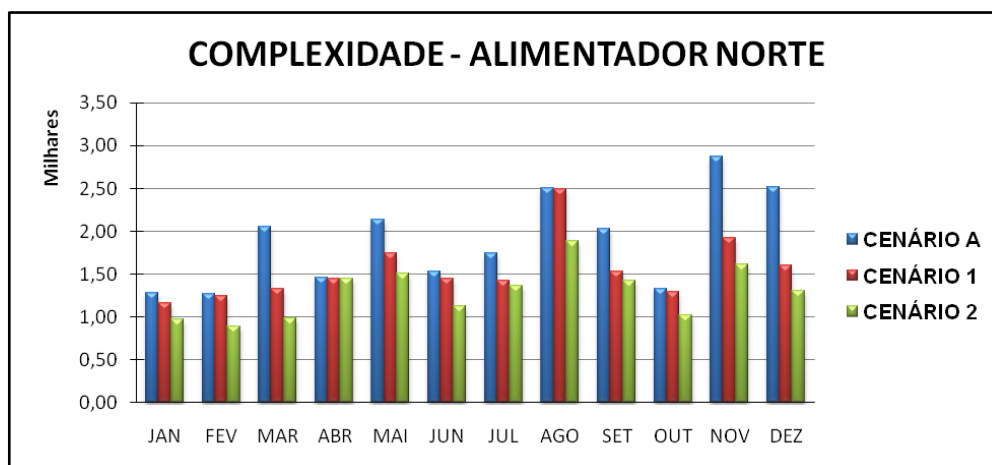


Figura 5.10 – Complexidade Alimentador Norte.

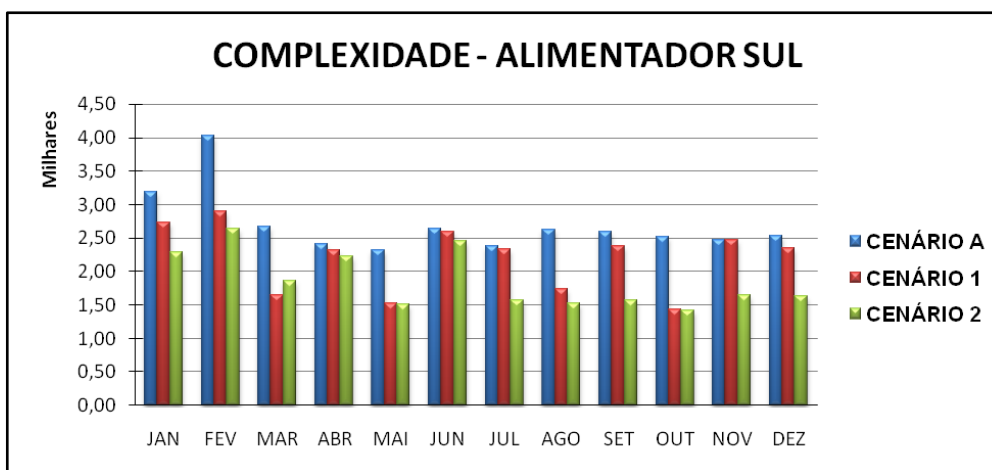


Figura 5.11 – Complexidade Alimentador Sul.

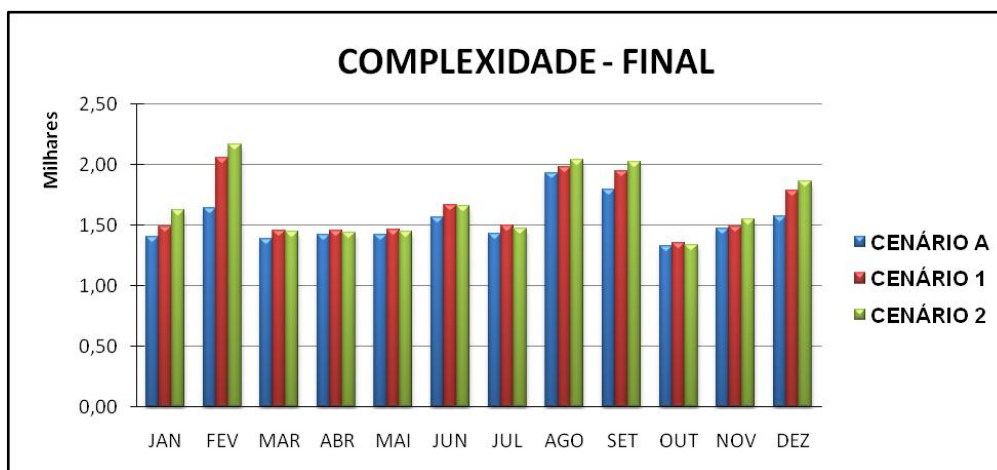


Figura 5.12 – Complexidade Final.

No setor Final, há uma inversão do nível de complexidade. CA apresenta valores mais baixos que os demais setores, cerca de 6,71% em relação a CP1 e 8,94% em relação a CP2. Isto se

explica pelo fato de que, após a reestruturação dos cenários CP1 e CP2, todo segmento paralelo a pista, tanto das rotas de chegada, como das rotas de saída, estavam localizados dentro do setor final.

Houve, então, um maior número de aeronaves no setor, bem como uma maior variação de proa das aeronaves. As SID do CA eram diretas para os fixos de saída e as aeronaves permaneciam em menor tempo dentro do setor final.

Igualmente acontece entre os níveis de CP1 e CP2. Nos meses em que houve maior número de aeronaves no circuito, o CP1 apresentou menores índices que CP2, em virtude do maior fluxo de circulação para o setor SW e sua respectiva utilização da pista 17. Também neste caso, houve menor tempo de voo e menor número de aeronaves no setor final. Assim, CP2 foi mais complexo que CP1 em 2,00%.

5.5 TEMPO DE ATRASO PARA DECOLAGEM

Nesta métrica foram relacionados todos os tempos para decolagem, exceto os tempos previstos para *push-back* e táxi. Assim foram computados apenas os atrasos em virtude de congestionamento de tráfego aéreo. (Figura 5.13). Isso se faz necessário para avaliar a eficiência da implantação de pistas paralelas no aeroporto.

Os valores apresentados para atraso de pouso são menores que os atrasos para decolagem, visto que, de acordo com as regras do ar, a prioridade de pouso é maior que a prioridade de decolagem, DECEA [43]. Entretanto, a métrica de atraso para pouso não foi adotada nesta pesquisa, pois apresentou grandes distorções para determinados tráfegos da amostra.

Tais distorções foram em função dos tráfegos VFR no circuito de tráfego do aeródromo, pois a sequência de pouso é definida, entre outros, pela regra de voo e os vãos IFR tem

precedência em relação aos vãos VFR. Isto fez com que aeronaves no circuito apresentassem valores muito altos de atraso em períodos de pico.

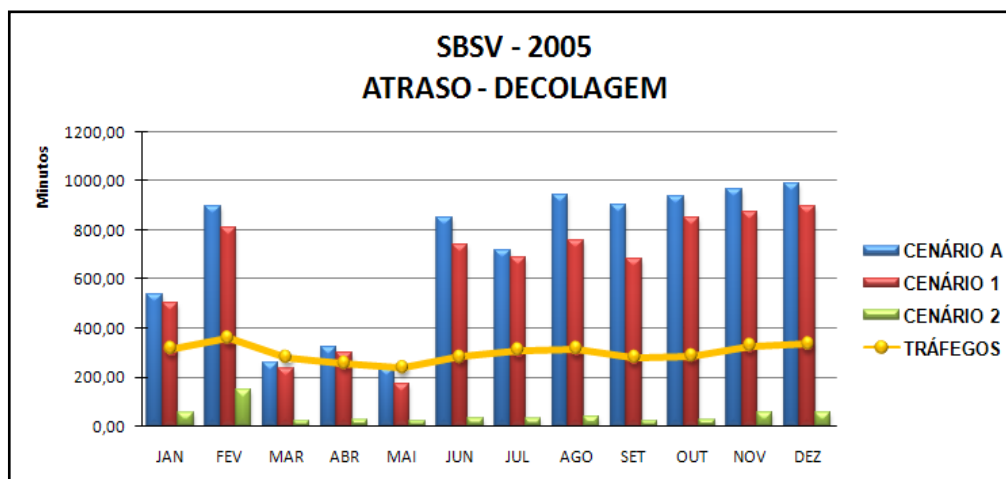


Figura 5.13 – Tempo de Atraso para Decolagens.

É nítido o ganho com a utilização de pistas paralelas e CP2 apresentou índices bem abaixo dos demais cenários. O ganho de CP1 em relação a CA foi menor (13,89%), pois a diferença está apenas na forma como o sequenciamento de aproximação se comportou a fim de permitir decolagens entre os pousos.

Segundo Mayer et al [12] e Hansen et al [61], os custos envolvidos em atraso para decolagem para os aeroportos dos EUA (*Aircraft Direct Operating Cost* - ADOC) variam entre \$20 e \$25 dólares/minuto. Adotando neste estudo o menor valor de custo como referência, podemos observar, em média, uma economia de 666,62 min. e 579,78 min. para CP2 em relação a CA e a CP1, respectivamente. Ou seja, uma economia de \$13.332,40 e \$11.595,60 por dia. Na relação entre CP1 e CA, percebemos uma economia para CP1 de 86,83 min., ou seja, \$1.736,60.

5.6 RESUMO DOS RESULTADOS

A Tabela 5.1 apresenta uma visão geral dos resultados, contendo todas as métricas e as variações na comparação entre os cenários. Em quase todos os resultados houve ganho na

evolução do CA para o CP1 e para o CP2 e de CP1 para o CP2, exceto pequenas variações (em vermelho) onde houve aumento de tempo e distância de voo para saídas entre CP1 e CP2 e, de complexidade do espaço aéreo no setor final, onde CA foi o cenário menos complexo.

Tabela 5.1 – Quadro resumo dos resultados.

MÉTRICA	ANÁLISE	COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS	VALOR RELATIVO (MÉDIA)	VARIAÇÃO
TEMPO DE VÔO	TOTAL	CA → CP1	10,33 %	↓
		CA → CP2	11,55 %	↓
		CP1 → CP2	1,09 %	↓
	SAÍDAS	CA → CP1	10,92 %	↓
		CA → CP2	9,89 %	↓
		CP1 → CP2	0,92 %	↑
	CHEGADAS	CA → CP1	9,79 %	↓
		CA → CP2	13,11 %	↓
		CP1 → CP2	2,97 %	↓
DISTÂNCIA DE VÔO	TOTAL	CA → CP1	8,16 %	↓
		CA → CP2	8,65 %	↓
		CP1 → CP2	0,45 %	↓
	SAÍDAS	CA → CP1	9,94 %	↓
		CA → CP2	9,05 %	↓
		CP1 → CP2	0,82 %	↑
	CHEGADAS	CA → CP1	6,52 %	↓
		CA → CP2	8,29 %	↓
		CP1 → CP2	1,65 %	↓
RESOLUÇÃO DE CONFLITOS	TOTAL	CA → CP1	40,56 %	↓
		CA → CP2	147,23 %	↓
		CP1 → CP2	75,88 %	↓
COMPLEXIDADE DO ESPAÇO AÉREO	SETOR 4	CA → CP1	53,92 %	↓
		CA → CP2	130,05 %	↓
		CP1 → CP2	48,22 %	↓
	SETOR 5	CA → CP1	21,55 %	↓
		CA → CP2	41,65 %	↓
		CP1 → CP2	16,12 %	↓
	ALIMENTADOR NORTE	CA → CP1	21,63 %	↓
		CA → CP2	47,17 %	↓
		CP1 → CP2	21,05 %	↓
	ALIMENTADOR SUL	CA → CP1	26,59 %	↓
		CA → CP2	48,06 %	↓
		CP1 → CP2	19,93 %	↓
	FINAL	CA → CP1	6,71 %	↑
		CA → CP2	8,94 %	↑
		CP1 → CP2	2,00 %	↑
ATRASO PARA DECOLAGEM (CUSTO)	SAÍDAS	CA → CP1	US\$ 1.736,60 / dia	↓
		CA → CP2	US\$ 13.332,40 / dia	↓
		CP1 → CP2	US\$ 11.595,60 / dia	↓

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Após o processo de análise dos resultados deste estudo, é possível identificar algumas limitações ao longo de todo o trabalho apresentado:

1. A Coleta de dados:

- a. A dificuldade de coleta de dados de movimento de tráfego aéreo durante o período de crise aérea limitou o período de análise. Foram detectados muitos dados distorcidos, dentre eles grandes separações e grades atrasos dos vôos regulares;
- b. Não foi possível a coleta de dados importantes que estavam presentes nas operações de tráfego de aeronaves nos aeroportos, tais como: meteorologia, NOTAM e registros de ocorrências. Algumas modelagens tiveram que ser abstraídas;
- c. O grande número de campos dos dados de movimento do SGTC, não preenchidos ou preenchidos erroneamente, restringiu a análise da amostra;
- d. O uso dos dias-pico foi de fundamental importância para análise do sistema, entretanto, a utilização das 24h para simulação aumentou o tempo de simulação e produção de *outputs*, o que não aconteceria se fossem analisadas as horas-pico;
- e. A variação dos dados em termos de mix e número de aeronaves, distâncias voadas e conflitos foi de fundamental importância para a real compreensão do movimento de aeronaves na TMA. Entretanto, o grande número de variáveis inviabilizou algumas análises formais dos resultados.

2. A ferramenta RAMS:

- a. A ferramenta de simulação limitou o escopo da pesquisa em alguns aspectos, principalmente na possibilidade do número de iterações. Para gerar um grande

número de iterações, o programa não pode ser fechado, pois do contrário, o sistema retorna para a primeira iteração.

Com simulações de grandes períodos (24h contínuas) eram freqüentes os *bugs* do programa devido à aleatoriedade dos dados e o uso da função “resolução de conflitos”. Quando o programa não conseguia resolver um problema de resolução de conflito (ex. aeronaves na mesma posição, no mesmo tempo e na mesma altitude), a simulação travava e RAMS apresentava uma informação de localização do erro, a fim de que o modelador pudesse resolver manualmente na base de dados. Na seqüência, quando sanado o problema, o sistema reiniciava à primeira iteração, apresentando os mesmos resultados.

- b. Alguns conceitos de *waypoints flyover* não estão bem resolvidos dentro do sistema, o que limitou uma modelagem mais apurada nas rotas ATS.

3. Complexidade do espaço aéreo:

- a. Como ainda é um conceito que traz uma série de fatores que não foram totalmente esclarecidos, a análise da complexidade não pode explicar todos os resultados encontrados e, conseqüentemente, análises estatísticas e de sensibilidade não puderam ser realizadas.

4. Resolução de conflitos:

- a. Algumas formas de resolução de conflitos não foram passíveis de modelagem devido ao tempo gasto para a resolução, dentre elas a vetoração de tráfegos.

5. Custos associados à implantação do sistema

- a. Houve uma dificuldade no acesso às informações de companhias aéreas nacionais e estrangeiras, e de provedores de serviços de tráfego aéreo para verificar os custos de

implantação do sistema PBN, tais como: treinamento, aviônicos, certificação e homologação de procedimentos.

6.2 ANÁLISE DA FERRAMENTA RAMS

Este estudo pode detectar algumas vantagens e desvantagens da ferramenta RAMS durante o processo de modelagem e simulação.

a) Vantagens

- i. Fácil inserção da base de dados das aeronaves, através de planilhas eletrônicas;
- ii. Boa visualização gráfica da simulação, com possibilidade de apresentação em “plano” ou em “perfil vertical”, e capacidade de alteração da velocidade de simulação de forma interativa;
- iii. Possibilidade de realizar operação *gate-to-gate*, com detalhes muito próximos do mundo real;
- iv. Geração de resultados através de relatórios detalhados e classificados para cada parâmetro do sistema.

b) Desvantagens:

i. Modelo Conceitual

1. Não permite a importação da base de dados gráficos como desenhos em CAD;
2. Não trabalha com declinação magnética (utilizada na aviação), os rumos e azimutes são referenciados ao Norte Verdadeiro;

3. Não especifica o datum utilizado (WGS84, SAD69) e, conseqüentemente, as coordenadas geográficas, distâncias e azimutes não são acurados necessitando de várias calibrações;
4. Não permite a inserção de coordenadas (polar, UTM, etc.) muito utilizadas em cartas aeronáuticas;
5. Não possui base de dados topográficos, sendo necessário o trabalho de cálculo em cartas de navegação a parte ou utilização de ferramenta em CAD;
6. Não trabalha com classificação de espaço aéreo (A a G) nem distingue as regras de voo (IFR e VFR);
7. Não trabalha agrupamento de setores, nem ativação e desativação de setores quando há mudanças de pista.
8. Não há como construir e analisar o segmento de aproximação perdida.

ii. Modelo Operacional

1. Não utiliza *waypoints flyover*;
2. Os raios de curva no banco de dados das aeronaves são aproximados;
3. Não permite a inserção da variável tempo nos procedimentos (afastamentos e esperas de procedimentos de aproximação), sendo necessária a conversão em distâncias;
4. Dificuldade na montagem de setores e, conseqüentemente, na avaliação de carga de trabalho dos controladores;
5. Não utiliza os padrões previstos de *path terminator*³³.

³³ Código de duas letras que define um tipo específico de trajetória de voo e sua terminação ao longo de um segmento de um procedimento RNAV/RNP. Atualmente existem 23 tipos de *path terminator* previstos pela ICAO.

6.3 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante todo o período de estudo, foram sinalizados alguns pontos importantes que servem de sugestões e recomendações para trabalhos futuros:

- a) O emprego da ferramenta ATM Analiser – esta ferramenta é um complemento ao RAMS PLUS para análise de dados gerados a partir da simulação. Entretanto, nesta pesquisa, não foram exploradas as suas potencialidades e ganhos de tempo de análise;
- b) Estudo sobre complexidade do espaço aéreo – é um tema atual, que está sendo pesquisado pela FAA/EUROCONTROL e que ainda requer maiores estudos a fim de esclarecer fatores de comportamento do tráfego nas diversas porções do espaço aéreo;
- c) O uso do RAMS no lado solo – a evolução do RAMS na parte de solo tem sido impulsionada por estudos da FAA e EUROCONTROL, entretanto ainda não houve estudos para cenários brasileiros que utilizassem esta ferramenta na análise de problemas relacionados à capacidade de pátio, tempo de ocupação de pista, entre outros;
- d) Coleta de dados – seguindo as orientações da ICAO e FAA, pesquisas relacionadas a tráfego aéreo devem continuar explorando a utilização de dados de picos de tráfego. Entretanto, a eficiência de uso da ferramenta de modelagem, bem como os resultados alcançados, poderá estar relacionada a períodos menores do que 24h, ou seja, com a análise de horas-pico de tráfego;
- e) Carga de trabalho dos controladores – esta análise não foi escopo deste trabalho, entretanto estudos de rotas PBN apontam para uma redução na carga de trabalho dos controladores, relacionadas à diminuição das comunicações e ao aumento do tempo de atenção de pilotos e controladores. Assim, estudos relacionando as áreas de procedimento e recursos humanos poderiam ser desenvolvidos;

- f) Rotas PBN – com a introdução de rotas mais precisas e com maior previsibilidade de voo, estudos voltados a uma análise de risco, bem como um possível aumento à exposição de ruídos em regiões sob estas rotas poderiam ser explorados.

6.4 CONCLUSÃO

Para a introdução de novos conceitos em ATM a ferramenta de simulação demonstra ser eficiente para avaliação do espaço aéreo quando o objetivo é a comparação entre diversos cenários. O ganho da simulação *fast-time* se caracteriza não apenas no tempo de solução do problema, mas em menor custo e em menor quantidade de recursos humanos envolvidos.

A modelagem em 3 cenários distintos permitiu a visualização de ganho para cada implementação realizada, seja apenas a introdução de rotas PBN e mantendo-se a configuração atual de pistas, seja com a introdução de rotas PBN para uma ampliação do complexo aeroportuário de Salvador.

A aplicação dos conceitos PBN e de circulação em TMA em espaço aéreo brasileiro atingiram os níveis de eficiência alcançados nos grandes aeroportos dos EUA e Europa, e trouxe benefícios tanto para os operadores de aeronaves, como para o provedor dos serviços de tráfego aéreo, refletidos em ganhos em termos de tempo e distância de voo, atrasos de decolagem, resolução de conflitos e complexidade de espaço aéreo.

Em uma análise de evolução do cenário atual (CA) para o cenário proposto 1 e 2 (CP1 e CP2), pode-se perceber um ganho em todas métricas utilizadas, exceto no índice de complexidade do espaço aéreo no Setor Final, onde houve um aumento cerca de 6,71% e 8,94%, respectivamente, em relação à CP1 e CP2. Entretanto, o aumento de complexidade dos cenários propostos neste setor foi muito menor que o aumento da complexidade de CA em todos os demais setores.

Em uma análise de evolução do cenário proposto 1 (CP1) para o cenário proposto 2 (CP2), pode-se observar que houve ganhos de tempo e distância de voo, embora relativamente pequenos, visto que ambos foram modelados com rotas PBN. As configurações de pistas favoreceram as decolagens para CP1, assim como as aproximações para CP2.

Embora CP2 tenha apresentado um aumento, em relação às saídas de CP1, nas métricas de tempo e distância de voo, 0,92% e 0,82% respectivamente, os demais resultados apresentam ganhos muito maiores. Fato semelhante ocorreu na complexidade do espaço aéreo no Setor Final, entretanto, mais uma vez o CP2 apresenta maior eficiência em todos os demais setores.

O cenário proposto 2 mostrou-se o cenário mais eficiente nas cinco métricas, apresentando ganhos muito maiores do que os pequenos valores de menor eficiência. Destaca-se, em relação aos demais cenários, os ganhos nas métricas de atrasos na decolagem (economia de US\$ 13.332,40 e US\$11.595,60 por dia em relação a CA e CP1, respectivamente) e resolução de conflitos (redução de 147,23% e 75,88% em relação a CA e CP1, respectivamente).

A análise do tráfego aéreo com base em diferentes amostras de dias ao longo do ano permitiu ter uma imagem da complexidade do tráfego aéreo em termos de mix e número de aeronaves, variação de utilização de rotas e aeroportos de origem/destino. Assim como a utilização de dias-pico foi importante para avaliar a capacidade do sistema atual e futuro.

Outra importante análise foi a complexidade do espaço aéreo. Pode-se perceber a variação de complexidade dentro de um mesmo setor ao longo do período observado, dependendo diretamente de fatores como número e comportamento das aeronaves, densidade do espaço aéreo, número de conflitos, entre outros, que afetam diretamente a performance de aeronaves e a carga de trabalho de controladores de tráfego aéreo.

Durante a fase de verificação e validação do modelo, a revisualização radar e o painel de especialistas, tanto de controle de tráfego aéreo como de elaboradores de procedimentos de navegação aérea, tiveram fundamental papel no sistema de simulação ATM.

A introdução do conceito da PBN trouxe vantagens principalmente na segurança da navegação e diminuição de custos operacionais, entretanto, aspectos relacionados à carga de trabalho de controladores/pilotos e exposição aos ruídos devem ser analisados minuciosamente no futuro.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Performance-based navigation manual**. 2. ed. Montreal, 1999. (Doc 9613).
- [2] BRASIL. Ministério da Defesa. Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária. **Anuário estatístico de movimento de aeronaves, cargas e passageiros (1991 a 2006)**. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br>>. Acesso em: 10 mai. 2007.
- [3] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Publicação de informações aeronáticas: AIP-MAP**. 2007. Disponível em: <<http://www.aisweb.aer.mil.br>>. Acesso em jun. 2007.
- [4] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Dados estatísticos de efetivo operacional em órgãos de controle**. [S. l.], 2006.
- [5] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **CAR/SAM roadmap for performance-based navigation**. Montreal, 2006.
- [6] BRASIL. Ministério da Defesa. Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária. **Planta arquitetônica de ampliação/reforma do complexo aeroportuário do aeroporto internacional deputado Luís Eduardo Magalhães –BA**. [S. l.], 2002.
- [7] MONTEIRO, M. A. **Síntese da navegação aérea: primeira parte: piloto privado**. 7. ed.. São Paulo: ASA, 2002.
- [8] MILOSAVLJEVIĆ, V. **Performance-based navigation: a concept for the future**. Belgrade: The Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade 2007.
- [9] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **CAR/SAM regional plan for implementation of CNS/ATM system**. Montreal, 1999.
- [10] SIQUEIRA, C A. **Navegação aérea segundo conceito CNS/ATM: custos e benefícios**. 2005. 145 f. Tese (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [11] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Roadmap for performance-based navigation: version 2.0**. Washington, DC, 2006.
- [12] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Aircraft operations: construction of visual and instrument flight procedures**. 5.ed. Quebec, 2006. v.2. (Procedures for air navigation services, Doc. 8168/OPS 611).

- [13] SPRONG, K. R. et al. **Improving flight efficiency through terminal area RNAV**. McLean: MITRE, CAASD, jun. 2005.
- [14] BARKER, D. R. et al. **Assessment of terminal RNAV mixed equipage**. McLean: MITRE, CAASD, 2004.
- [15] SPRONG, K. R. **Measuring the effects of RNAV departure procedures on airport efficiency**. McLean: MITRE, CAASD, 2005.
- [16] MAYER, R. H.; SPRONG, K. R. **Improving terminal operations: benefits of RNAV departure procedures at Dallas-Fort Worth and Hartsfield-Jackson Atlanta International Airports**. McLean: MITRE, CAASD, 2007.
- [17] MAYER, R. H.; SPRONG, K. R. **Analysis of RNAV arrival operations with descend via Clearances at Phoenix Airport**. McLean: MITRE, CAASD, 2006.
- [18] SOUZA, F. M. A fórmula mágica da IATA na América Latina. **Revista Flap Internacional, Espaço Técnico**, 2008. Disponível em: <<http://www.revistaflap.com.br>>. Acesso em: 04 mar. 2008
- [19] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. **Airport and air navigation services**. Montreal. Disponível em: <<http://www.iata.org>>. Acesso em: 04 mar. 2008.
- [20] POGIANELO, M. L. **Análise do espaço aéreo brasileiro por meio de simulação "fast time: estudo de caso na área de controle terminal Recife**. 2008. 143 f. Tese (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [21] EUROPEAN GNSS SUPERVISORY AUTHORITY. **Galileo programme**. 2005. Disponível em: <<http://www.gsa.europa.eu/go/galileo/programme>>. Acesso em: 22 jul. 2008.
- [22] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **AIC 17/99 sistema de posicionamento global: GPS**. Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: <<http://www.aisweb.aer.mil.br>>. Acesso em: 15 jun. 2007.
- [23] EUROPEAN ORGANIZATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION. **FALBALA project**. Bretigny-sur-Orge, 2004. (CARE/ASAS/Sofréavia, Version 1.0).
- [24] EUROPEAN ORGANIZATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION. **Guidance material for the design of terminal procedures for area navigation**: edition 3.0. Bretigny-sur-Orge, 2003. (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV).
- [25] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **United States standard for terminal instrument procedures: TERPS**. 3. ed. Washington, DC, 2007.

- [26] CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. 1999. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [27] HÚPALO, M. F. **Análise da área de controle terminal São Paulo (TMA-SP) por meio de simulação (fast-time simulation)**. 2003. 146 f. Tese (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [28] PHILLIPS, M. R.; MARSH, D. T. The Validation of fast-time air traffic simulations in practice. **Journal of the Operational Research Society**, v.51, p. 457-464, 2000.
- [29] ISA SOFTWARE. **Reorganized ATC mathematical simulator: RAMS plus**. Manchester, 2004
- [30] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Best practices in the development of simulation scenarios for validation activities in fast and real-time simulation**. Washington, DC, 2003. Disponível em: <http://www.tc.faa.gov/acb300/techreports/AP5-BP2_11-20-03.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2007.
- [31] SARGENT, R. G. **Verification and validation of simulation models**. Syracuse: College of Engineering and Computer Science Syracuse University 1998.
- [32] JAIN, R. **The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling**. New York: Wiley-Interscience, 1991.
- [33] BALCI, O. **Principles and techniques of simulation validation, verification, and testing**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.
- [34] RAO, L.; OWEN, L.; GOLDSMAN, D. **Development and application of a validation framework for traffic simulation models**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington DC. **Proceedings...** Washington DC: ACM, 1998. p. 1079-1086
- [35] UCHÔA, F. S. **Uma análise comparativa entre ambientes de simulação e linguagens de propósito geral para o desenvolvimento de simulações**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduado em Engenharia da Computação) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife.
- [36] SEILA, A. F. **Introduction to simulation**. Athens: Terry College of Business, University of Georgia, 1995.
- [37] SANTANA, E. S. M. **Análise de novos cenários operacionais para o aeroporto internacional de São Paulo/Guarulhos**. 2002. 121 p. Tese (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

- [38] MOSER, R. F. **Simulação e análise de configurações aeroportuárias utilizando visual SIMMOD**: aplicação ao aeroporto internacional de São Paulo/Guarulhos. 2007. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [39] FOGARI, S. **Initial economical assessment of ATM Scenarios produced by fast- time simulation using data envelopment analysis**. 2006. Tesi (Laurea in Ingegneria Gestionale) – Università Degli Studi di Trieste, Laurea, 2006.
- [40] MAJUMDAR. A.; POLAK John. Estimating capacity of Europe's airspace using a simulation model of air traffic controller workload. In: CONGRÈS ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2001. **Proceedings...** Washington, DC, TRB, 2001. p. 0-43
- [41] TEIXEIRA, R J G. **Análise do impacto do uso da re-setorização dinâmica na carga de trabalho do controlador de tráfego aéreo por meio de simulações computacionais**. 2007. Tese (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [42] OLIVEIRA, M. **Carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo**: análise da área de controle terminal de **Brasília** por meio de simulação. 2007. 120 p. Tese (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- [43] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **ICA 100-12**: regras do ar e serviços de tráfego aéreo: 2ª emenda, de 18 de jan. de 2007.
- [44] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo Terceiro. **Manual de órgão ATC**: Centro de Controle de Área de Recife. Recife, 2007.
- [45] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo Terceiro. **Modelo operacional**: Centro de Controle de Área de Recife. Recife, 2007.
- [46] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Salvador. **Manual de órgão ATC**: torre de controle de Salvador. Salvador, 2007.
- [47] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Salvador. **Modelo operacional**: torre de controle de Salvador. Salvador, 2007.
- [48] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Salvador. **Manual de órgão ATC**: controle de aproximação de Salvador. Salvador, 2007.
- [49] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Salvador. **Modelo operacional**: controle de aproximação de Salvador. Salvador, 2007.
- [50] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **AIC 01/02 rotas especiais de aeronaves em vôo visual na área metropolitana de Salvador**. 2007. Disponível em: <<http://www.aisweb.aer.mil.br>>. Acesso em: 23 jun./2007.

- [51] BRASIL. Ministério da Defesa. Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária. **Aeroporto Internacional de Salvador**. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br>>. Acesso em: 27 mai. 2007.
- [52] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Salvador. **Dados estatísticos de movimento diário do sistema de gerenciamento de torre de controle**. Salvador, 2006.
- [53] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Aerodrome design and operations**. 4. ed., Montreal, 2004. (ICAO Publications and Training Aids: Annexes to the Conventions SARPs, Annex 14, v.1.)
- [54] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Salvador. **Dados estatísticos de movimento diário do sistema de ficha de progressão de voo (FPV)**. Salvador, 2006.
- [55] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. Aeroportos. **Capacidade de pista**. Disponível em: <<http://www.cgna.gov.br>>. Acesso em abril/2008.
- [56] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Airport capacity and delay**. Washington, DC., 1995. (AC 150/5060-5).
- [57] BRASIL. Ministério da Defesa. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **ICA 100-22 : serviço de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo**. 2007. Disponível em: <www.aisweb.aer.mil.br>. Acesso em: 10 jun. 2008.
- [58] SRIDHAR, B.; SHETH, K. S.; GRABBE, S. **Airspace complexity and its application in air traffic management**. 2. ed. Orlando: Europe Air Traffic Management R&D Seminar. 1998.
- [59] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **An evaluation of air traffic control complexity**. Washington, DC, 1996. (Ames Research Center. Final Report. Contract Number NAS2-14284).
- [60] HANSEN, M. M. et al. Aviation infrastructure performance and airline cost: a statistical cost estimation approach. **Transportation Research Part E**, v. 37, n. 1, p. 1-23, mar. 2001.



APÊNDICE A
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
Divisão de Engenharia Civil
Departamento de Transporte Aéreo

FICHA DE VERIFICAÇÃO - SIMULAÇÃO ATM FAST-TIME
MODELO CONCEITUAL

PROJETO:	SIMULAÇÃO N°	
AUTOR:	DATA:	HORA:

ENTIDADE		SIM	NÃO	OBSERVAÇÕES	
SOLO	AERÓDROMO	NOME			
		COORDENADAS			
		PISTAS			
		GATES			
	AUXÍLIO À NAVEGAÇÃO	NOME			
		COORDENADAS			
		TIPO			
	PISTA	COORDENADAS			
		DIMENSÕES			
		RUMOS			
		SAÍDAS			
	TAXI	DIMENSÕES			
		PONTOS DE CRUZAMENTO			
		SAÍDAS DE ALTA			
GATE	COORDENADAS				
ESPAÇO AÉREO	FIR	LIMITE VERTICAL/HORIZONTAL			
	CTA/UTA	LIMITE VERTICAL/HORIZONTAL			
	TMA	LIMITE VERTICAL/HORIZONTAL			
	CTR	LIMITE VERTICAL/HORIZONTAL			
	ATZ	LIMITE VERTICAL/HORIZONTAL			
	AEROVIA SUPERIOR	LIMITES			
		FIXOS			
	AEROVIA INFERIOR	LIMITES			
		FIXOS			
	ROTA DE SAÍDA	NOME			
		TIPO			
		FIXOS			
	ROTA DE CHEGADA	NOME			
		TIPO			
		FIXOS			
	FIXO E WAYPOINT	NOME			
		COORDENADAS			
		TIPO			
	SETOR	LIMITE VERTICAL/HORIZONTAL			
AERONAVE	MODELO				
	CATEGORIA				
	EQUIPAMENTO DE NAVEGAÇÃO				
	RAIO DE GIRO				
	BANK ANGLE				
	DIMENSÕES				
OBSERVAÇÕES GERAIS:					



APÊNDICE B

120

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
Divisão de Engenharia Civil
Departamento de Transporte Aéreo

FICHA DE VERIFICAÇÃO - SIMULAÇÃO ATM FAST-TIME

MODELO OPERACIONAL

PROJETO:	SIMULAÇÃO N°	
AUTOR:	DATA:	HORA:

ENTIDADE		SIM	NÃO	OBS
SOLO	AUXÍLIO À NAVEGAÇÃO	SEPARAÇÃO APLICADA		
		ERRO DO EQUIPAMENTO		
		DISTRIBUIÇÃO ESTOCÁSTICA		
	PISTA	TEMPO DE OCUPAÇÃO		
		PONTO DE TOQUE/DISTRIBUIÇÃO		
		ESTRUTURA DE DADOS - FIFO		
	TAXI	TIPO DE USO		
		GATE LINK		
	GATE	TIPO DE USO		
		PUSH-BACK		
DISTRIBUIÇÃO ESTOCÁSTICA				
ESPAÇO AÉREO	ROTA DE SAÍDA	SEPARAÇÕES		
		RESTRIÇÕES - ALTITUDES		
		RESTRIÇÕES - VELOCIDADES		
	ROTA DE CHEGADA	SEPARAÇÕES		
		RESTRIÇÕES - ALTITUDES		
		RESTRIÇÕES - VELOCIDADES		
	FIXO E WAYPOINT	SEPARAÇÃO APLICADA		
		ERRO DO EQUIPAMENTO		
		DISTRIBUIÇÃO ESTOCÁSTICA		
	SETOR	SEPARAÇÃO EMPREGADA		
TIPO DE SERVIÇO EMPREGADO				
AERONAVE	RAZÕES DE DESCIDA / SUBIDA			
	VELOCIDADES – SUBIDA/DESCIDA/CRUZEIRO/TAXI			
	NÍVEL DE VÔO / TEMPO DE VÔO			
	AERÓDROMO DE PARTIDA/DESTINO			
	ROTAS DE SAÍDA/CHEGADA			
	COMPANHIA AÉREA			
	TIPO			
ATM	TIPO CONTROLADOR	TÁTICO		
		PLANEJADOR		
	WORKLOAD	QUANTIDADE DE TAREFAS		
		DURAÇÃO DAS TAREFAS		
		PESO		
		DISTRIBUIÇÃO ESTOCÁSTICA		
	ÁREA DE CONTROLE E PRÉ-CONTROLE	TÁTICO		
		PLANEJADOR		
	PONTOS DE HAND-OFF			
PARÂMETROS DE COMPLEXIDADE DO ESPAÇO AÉREO				

OBSERVAÇÕES:

APÊNDICE C

CÁLCULO DE CAPACIDADE DE PISTA DO AEROPORTO DE SALVADOR

Este Apêndice está dividido em duas partes, sendo a primeira referente ao cálculo de capacidade para a configuração atual de pistas convergentes e, a segunda, referente ao cálculo de capacidade para uma possível configuração de pistas paralelas previstas no projeto da INFRAERO de 2002 (Anexo I).

Os cálculos aqui descritos estão baseados no documento *Airport Capacity and Delay*. (AC 150/5060-5) da FAA [56]. Neste documento, a capacidade é definida como o número máximo de operações que podem ocorrer em uma hora. Na aplicação destes cálculos foi necessária a compreensão das atividades aeronáuticas, tanto para os procedimentos existentes, como para uma possível remodelação de pistas.

Assim, são considerados alguns fatores neste estudo:

- a) Mix^{34} de Aeronaves;
- b) Regras e procedimentos de tráfego aéreo que mais se assemelha aos aplicados nos aeroportos norte-americanos;
- c) Porcentagens iguais de chegadas e partidas;
- d) Número de saídas de pista;
- e) Porcentagens de toque e arremetida;
- f) Espaço aéreo sem limitações;
- g) Uma pista equipada com ILS.

A capacidade horária de pista é expressa pela seguinte equação: $C * T * E$, onde:

³⁴ É uma porcentagem relativa de operação para cada uma das quatro classes de aeronaves (A, B, C e D). Estas classes levam em consideração o peso da aeronave, número de motores e esteira de turbulência produzida.

- a) C^* - capacidade horária base - determinada através da configuração de pista, *Índice-Mix* e percentual de pousos;
- b) T – fator de toque e arremetida – determinado pelo percentual de toques e arremetidas e *Índice-Mix*;
- c) E – fator de saída – determinado pelo número de saídas, computadas a partir da cabeceira de pouso até o final de pista, e percentual de pousos.

1. PISTAS CONVERGENTES

Atualmente, no aeroporto de Salvador a configuração de operacionalidade pode se apresentar de duas maneiras (figura C-1). A primeira e a mais utilizada com a operação nas pistas 10 e 17 e a segunda, com a operação nas pistas 28 e 17. Cada uma destas configurações irá contribuir com uma porcentagem de utilização para o cálculo final de capacidade.

Para este estudo, foram utilizados os dados do Sistema de gerenciamento de Torre de Controle de Salvador, coletados entre janeiro de 2003 e agosto de 2007, para a composição do *Mix* de aeronaves.

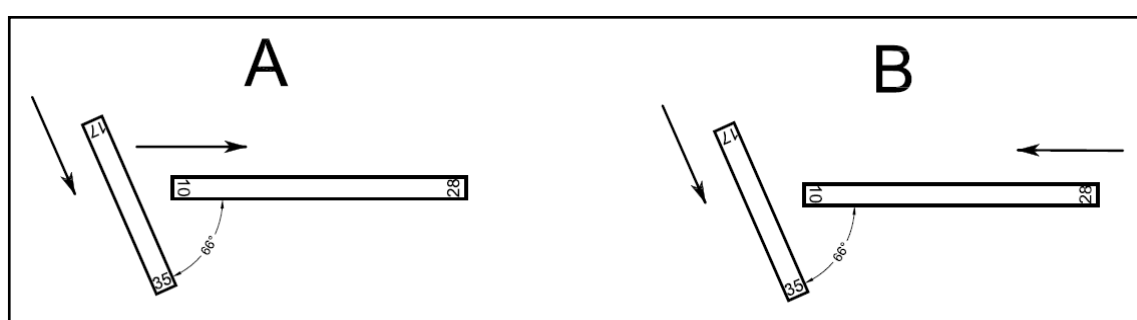


Figura C.1 – Configuração atual de operacionalidade de pistas em Salvador.

De posse destes dados, foi possível observar duas situações de operacionalidade relacionadas às condições meteorológicas e às configurações de pista para aproximação/decolagem. A primeira situação, adotada pela FAA, está diretamente ligada ao número de operações em

cada configuração. Assim, é possível verificar a contribuição de cada configuração pelo número de movimentos.

Normalmente a configuração B (28 e 17) é a menos utilizada e aplicada nos meses chuvosos, onde há variação brusca do vento. Entretanto, esta configuração é a que possui menores recursos de auxílios à aproximação. Algumas aeronaves tipo “C” e “D”, quando em condições meteorológicas deterioradas, optam por um aeroporto de alternativa para o pouso e, conseqüentemente, há uma redução do número de operações neste período.

Tal redução diverge de uma segunda situação, que está ligada às horas de operação em cada configuração. Neste caso, levando em consideração as horas de operação, há um aumento da contribuição de operacionalidade na configuração B. Portanto, há uma diferença no percentual de contribuição para cada configuração que é utilizada para o cálculo final:

- a) Considerando o número de operações, temos: **98,8% (A) e 1,2% (B)**;
- b) Considerando as horas de operação, temos: **91,3% (A) e 8,7% (B)**.

Apesar de serem observadas tais variações de operacionalidade neste aeroporto, e que podem contribuir para uma pequena mudança de capacidade, este estudo irá adotar os valores encontrados para o número de operações, como recomenda a FAA.

Para o tipo de configuração de pista foi adotado o padrão da FAA de pistas convergentes, em forma de “T”, com ângulo de convergência entre 15° e 90°.

No modelo, é necessário o cálculo do *Índice-Mix*³⁵, no qual são consideradas as seguintes classes de aeronaves:

³⁵ É uma expressão matemática. É a porcentagem de aeronaves classe “C” mais três vezes o percentual de aeronaves classe “D”.

- a) Tipo A - pequenos monomotores pesando até 5.700 kg;
- b) Tipo B - pequenos bimotores pesando até 5.700 kg;
- c) Tipo C - aeronaves entre 5.700 e 136.000 kg;
- d) Tipo D - aeronaves pesando mais de 136.000 kg.

O valor do *Índice-Mix* é: $(\% C) + 3 \times (\% D)$. Assim, para Salvador temos:

Tipo A e B – 48%	}	$\text{Índice-Mix} = 47 + 3 \times (5) = \mathbf{62}$
Tipo C – 47%		
Tipo D – 5%		

De acordo com os dados, pode-se observar que há algumas operações de toque e arremetida no aeroporto, principalmente em função das aeronaves militares em treinamento. Estes procedimentos equivalem a 4% do movimento diário.

Em relação ao número de saídas, temos (figura C.2) a distância de cada TWY em relação à cabeceira que. Pelo *Índice-Mix* = 61, devemos considerar apenas as saídas entre 1067m e 1981m a partir da cabeceira. As TWY que dão acesso aos pátios militares (Anexo V), não foram consideradas, pois não permitem o acesso de aeronaves da aviação regular e geral.

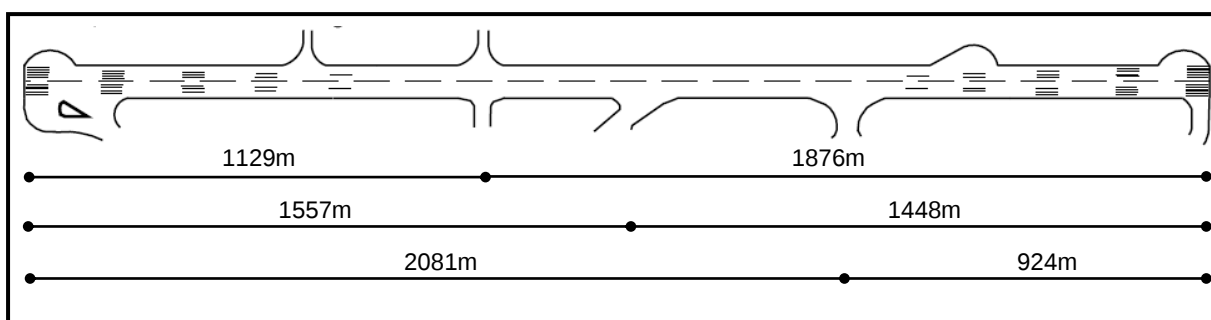


Figura C.2 –Pista 10/28 de Salvador – número de saídas.

1.1 CÁLCULOS

1.1.a VFR

CONFIGURAÇÃO “A”

Pelo Ábaco temos:

$$C^* = 102 \quad T = 1,02; \quad E = 0,92 \quad , \text{ portanto:}$$

$$\text{Capacidade} = 102 \times 1,02 \times 0,92 = \mathbf{95 \text{ aeronaves}}$$

CONFIGURAÇÃO “B”

Pelo Ábaco temos:

$$C^* = 82 \quad T = 1,02; \quad E = 0,92 \quad , \text{ portanto:}$$

$$\text{Capacidade} = 82 \times 1,02 \times 0,92 = \mathbf{76 \text{ aeronaves.}}$$

CAPACIDADE TOTAL - VFR

Pela contribuição de cada configuração temos: 98,8% (A) e 1,2% (B). Assim, temos:

$$\text{Capacidade horária VFR} = (0,988 \times 95) + (0,012 \times 76) = \mathbf{94 \text{ aeronaves}}$$

1.1.b IFRCONFIGURAÇÃO “A”

Pelo Ábaco temos:

$$C^* = 55 \quad T = 1,00; \quad E = 1,00 \quad , \text{ portanto:}$$

$$\text{Capacidade} = 55 \times 1,00 \times 1,00 = \mathbf{55 \text{ aeronaves}}$$

CONFIGURAÇÃO “B”

Pelo Ábaco temos:

$$C^* = 50 \quad T = 1,00; \quad E = 1,00 \quad , \text{ portanto:}$$

$$\text{Capacidade} = 50 \times 1,00 \times 1,00 = \mathbf{50 \text{ aeronaves.}}$$

CAPACIDADE TOTAL - IFR

Pela contribuição de cada configuração temos: 98,8% (A) e 1,2% (B). Assim, temos:

Capacidade horária IFR = $(0,988 \times 55) + (0,012 \times 50) = \mathbf{54 \text{ aeronaves}}$.

Portanto, temos que a capacidade horária do Aeroporto de Salvador, com a configuração atual de pistas convergentes, é de **94 aeronaves** (operação em condições visuais) e **54 aeronaves** (operação em condições por instrumentos).

2. PISTAS PARALELAS

Considerando para uma possível configuração de pistas paralelas e adotando o mesmo *Índice-Mix* (= 61), percentual de toques e arremetidas e números de saídas, temos:

2.1 CÁLCULOS

2.1.a VFR

Pelo Ábaco temos:

$C^* = 122$ $T = 1,04$; $E = 0,91$, portanto:

Capacidade = $122 \times 1,04 \times 0,91 = \mathbf{115 \text{ aeronaves}}$

2.1.b IFR

Pelo Ábaco temos:

$C^* = 110$ $T = 1,00$; $E = 1,00$, portanto:

Capacidade = $110 \times 1,00 \times 1,00 = \mathbf{110 \text{ aeronaves}}$

Portanto, temos que a capacidade horária do Aeroporto de Salvador, com a configuração de pistas paralelas é de **115 aeronaves** (operação em condições visuais) e **110 aeronaves** (operação em condições por instrumentos).

APÊNDICE D

CRITÉRIOS DE ELABORAÇÃO DE ROTAS PBN

Os critérios aqui abordados se referem à construção das rotas RNAV e RNP para os procedimentos de navegação aérea para Terminal, tendo como base os documentos Doc 9613 - *Performance-Based Navigation Manual* e o Doc 8168 - *Construction of Visual and Instrument Flight Procedures* da ICAO [1] e [12], englobando os seguintes segmentos: chegada (STAR), aproximação inicial, aproximação intermediária, aproximação final³⁶, aproximação perdida (arremetida) e saída.

Dentro do conceito PBN, a ICAO estabelece para cada fase de voo a especificação de navegação a ser aplicada e sua acuracidade requerida, como mostra a Figura D.1. A partir do estabelecimento destes tipos de navegação, a fase seguinte está relacionada à construção de cada segmento.

Navigation specification	Flight phase							
	En-route oceanic/remote	En-route continental	Arrival	Approach				Departure
				Initial	Intermediate	Final	Missed	
RNAV 10	10							
RNAV 5		5	5					
RNAV 2		2	2					2
RNAV 1		1	1	1	1		1 ^b	1
RNP 4	4							
Basic-RNP 1			1 ^{a,c}	1 ^a	1 ^a		1 ^{ab}	1 ^{a,c}
RNP APCH				1	1	0.3	1	

a. The navigation application is limited to use on STARs and SIDs only.
b. The area of application can only be used after the initial climb of a missed approach phase.
c. Beyond 30 NM from the airport reference point (ARP), the accuracy value for alerting becomes 2 NM.

Figura D.1 – Aplicação do tipo de navegação em cada fase de voo.
Fonte: ICAO [1].

³⁶ Neste estudo, não foi modelado o segmento de aproximação perdida, pois o programa computacional RAMS não permite sua elaboração. O RAMS foi concebido para otimizar todas as aproximações, em termos de tempo, distância e queima de combustível e, portanto, não prevê uma aproximação perdida que acarretaria em um aumento dos custos operacionais.

Este estudo adota o recomendado pela ICAO (Figura D.2) no estabelecimento da rotas ATS propostas. Assim, uma sequência de especificações RNAV e RNP foi empregada. Para as rotas de chegadas foram aplicadas os critérios de RNAV-1, para as fases de aproximação foram aplicadas RNP-APCH e para as rotas de saída RNP-1.

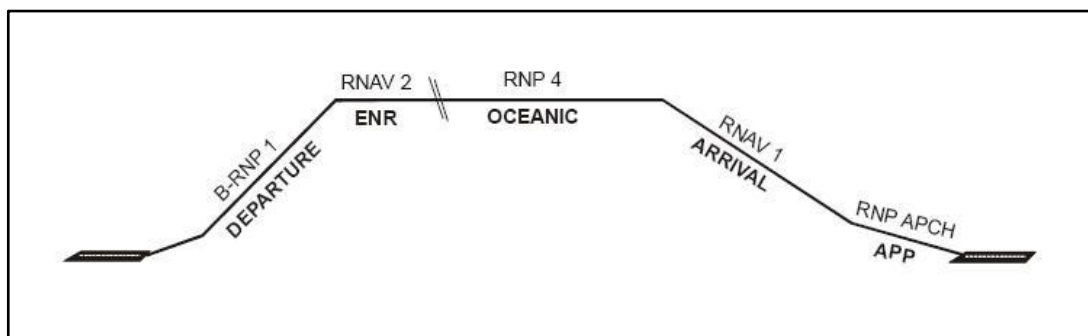


Figura D.2 – Exemplo de uma aplicação de especificação RNAV e RNP para rotas ATS.
Fonte: ICAO [1].

Para construção de cada segmento, é necessário adotar requisitos específicos, tais como: tolerância de fixos (Tabela D.1), gradientes de descida ou subida, áreas de proteção, mínimos de liberação de obstáculos (MOC) (Tabela D.2) e velocidades (Tabela D.3).

Tabela D.1 - Tolerâncias do sistema e semi-largura da área de proteção para Rotas RNAV.

TOLERÂNCIAS	IAF ³⁷	IAF ³⁸	IAF ³⁹	IF ⁴⁰	FAF ⁴¹	MAPT ⁴²	FIXO SAÍDA ⁴³	FIXO SAÍDA ⁴⁴
Acuracidade do sistema de navegação (NM)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Limite de alarme do monitoramento de integridade (NM)	2,00	1,00	1,00	1,00	0,30	0,30	1,00	2,00
Tempo para alarme (seg)	30	10	10	10	10	10	10	30
Erro técnico de voo (NM)	2,00	0,50	0,50	0,50	0,30	0,20	0,50	2,00
Tolerância longitudinal (NM)	2,00	1,00	1,00	1,00	0,30	0,30	1,00	2,00
Tolerância transversal (NM)	4,00	1,50	1,50	1,50	0,60	0,50	1,50	4,00
Semi largura da área (NM)	8,00	3,00	3,00	3,00	1,20	1,00	3,00	8,00

Fonte: ICAO [12]

³⁷ Fixo situado no segmento de chegada a uma distância superior a 25NM do aeródromo.

³⁸ Fixo situado no segmento de chegada a uma distância inferior a 25NM do aeródromo.

³⁹ Fixo do segmento inicial.

⁴⁰ Fixo do segmento intermediário.

⁴¹ Fixo do segmento final.

⁴² Fixo do segmento de aproximação perdida.

⁴³ Fixo do segmento de saída ou aproximação perdida situado a uma distância inferior a 25NM do aeródromo.

⁴⁴ Fixo do segmento de saída ou aproximação perdida situado a uma distância superior a 25NM do aeródromo.

Tabela D.2 - Requisitos mínimos para cada segmento de rota GNSS.

Requisitos	Chegada	Inicial	Intermediária	Final	Aproximação Perdida	Saída
MOC (ft)	1000	1000	500	250	98/164	295/394
Gradiente de descida/subida ótimo (%)	não requerido	4	0	5,24	2,5	3,3
Gradiente de descida/descida máximo (%)	não requerido	8	5,24	6,1	não requerido	não requerido
comprimento ótimo do segmento (NM)	não requerido	5	5	5	não requerido	não requerido
Ângulos máximo de mudança de curso (°)	120	120	30	0	15 (inicial)	15(inicial)

Fonte: ICAO [12].

Tabela D.3 - Velocidades (TAS) empregadas nos cálculos de procedimentos.

SEGMENTO	CATEGORIA DE AERONAVES				
	A	B	C	D	E
Chegada (dentro de 25NM)	90/149	120/179	160/239	185/250	185/250
Inicial	90/150	120/180	160/240	185/250	185/250
Intermediária	90/151	120/181	160/241	185/250	185/250
final	70/100	85/130	115/160	130/185	155/230
Aproximação Perdida	100	130	160	185	230
Saída	110	150	240	265	275

Fonte: ICAO [12].

Além destes critérios, foram utilizadas as distâncias mínimas entre *waypoints*, a configuração de aproximação e a nomenclatura dos fixos, que serão abordados posteriormente.

Para uma rota RNP, as tolerâncias longitudinais e transversais são iguais ao valor RNP de referência. Portanto, uma rota RNP-1, terá tolerância igual a 1NM tanto longitudinal como transversal. A semi-largura destas rotas é especificada pela expressão: $2 \times \text{XTT} + \text{BV}$, onde:

XTT – tolerância transversal;

BV – *buffer value* (valor de segurança).

Este buffer varia a depender de cada fase de vôo, conforme Tabela D.4

Tabela D.4 – Valor do *buffer* para rotas RNP.

SEGMENTO	BUFFER VALUE (NM)
Chegada (dentro de 25NM)	0,50
Inicial	0,50
Intermediária	0,50
final	0,20
Aproximação Perdida	0,30
Saída	0,30

Fonte: ICAO [12].

Em cada segmento concebido são projetadas as áreas de proteção para análise de obstáculos. São identificados os obstáculos mais proeminentes (obstáculos de controle) que servirão de base para o estabelecimento de altitudes mínimas de descida.

D.1 WAYPOINTS

Os *waypoints* em uma configuração de rotas podem ser *fly-by* ou *flyover*. Neste estudo, todos os *waypoints* foram *fly-by*, ou seja, uma antecipação de curva é necessária antes de atingir o *waypoint*.

D.1.a Distância mínima entre waypoints

Com a finalidade de permitir que a aeronave, após mudança de curso, tenha uma distância mínima de estabilização no próximo segmento de rota (Figura D.3), distâncias mínimas entre *waypoints* são calculadas levando em consideração os seguintes critérios:

- a) Velocidade da aeronave;
- b) Altitude da aeronave;
- c) Raio de curva;
- d) Ângulo de inclinação (*bank angle*) assumindo valores de 15°, 20° ou 25° a depender da fase de voo;
- e) Tipo do *waypoint* (*fly-by* ou *flyover*);
- f) Ângulo de mudança de curso.

A necessidade destes cálculos foi necessária apenas nos segmentos dentro do setor final de controle. Este setor apresenta uma quantidade de *waypoints* muito próximos, que exigiu uma análise mais detalhada. Distâncias entre *waypoints* superiores a 10NM não necessitaram de cálculos.

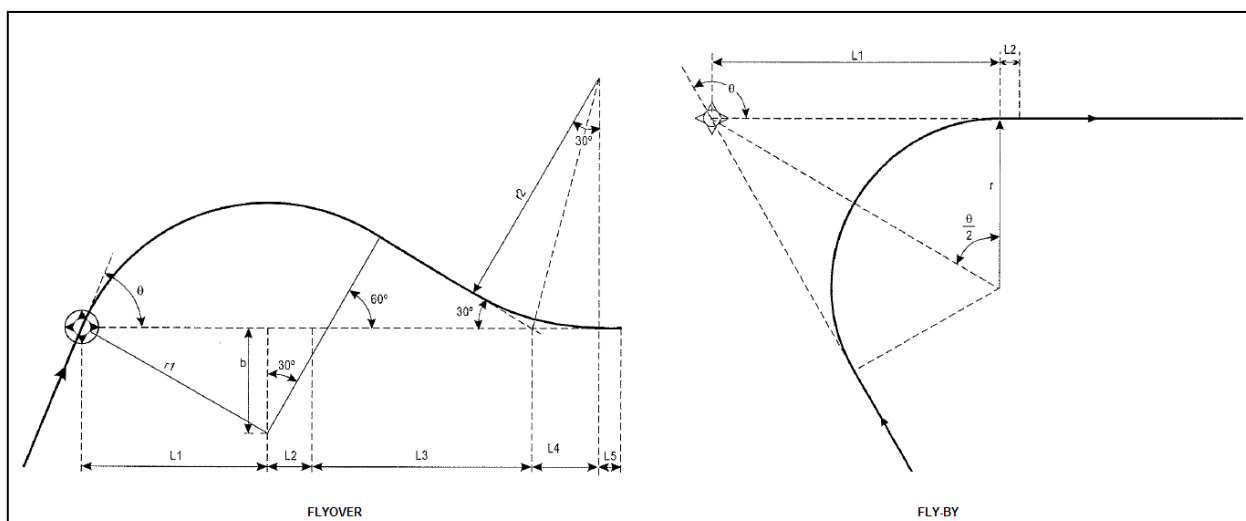


Figura D.3 – Distância mínima entre waypoints.

Fonte: ICAO [12].

D.1.b Nomenclatura dos waypoints

Quando na criação de rotas RNAV ou RNP, a nomenclatura dos waypoints segue critérios definidos, tais como:

- Os fixos serão identificados por um código alfanumérico;
- Composição de 2 letras e 3 números. As letras representam as duas últimas letras da localidade e os números serão maiores de 360 e final diferente de 0 e 5;
- Poderá, caso coincidente, ter o mesmo nome de um fixo já existente;
- Poderá, caso coincidente, ter o nome cabeceira. (Ex.: RWY10, RWY35);
- No caso de pistas paralelas, acrescentar a letra referente a THR. (Ex. RW10R, RW28L);
- Enumerar, se possível, na sequência de aproximação.

Portanto, este estudo levou em consideração a existência de numeração no procedimento GNSS atual da pista 28 de Salvador. Foi adotado a sequência de waypoints iniciando em 400 que diverge dos números atuais (entre 370 e 390). Assim, foram estabelecidos waypoints para os cenários Proposto 1 e 2, que possuem rotas PBN (Tabela D.5).

Tabela D.5 - Localização de waypoints - cenários Propostos 1 e 2.

CENÁRIO PROPOSTO 1				CENÁRIO PROPOSTO 2			
WAYPOINT	LATITUDE		LONGITUDE	WAYPOINT	LATITUDE		LONGITUDE
SV401	12,8643	S	38,5208 W	SV401	12,8643	S	38,5208 W
SV402	12,9635	S	38,5865 W	SV402	12,9635	S	38,5865 W
SV403	13,0305	S	38,4843 W	SV403	12,9787	S	38,5967 W
SV404	12,9461	S	38,5030 W	SV404	13,0432	S	38,4955 W
SV406	12,9561	S	38,1234 W	SV406	12,9613	S	38,5132 W
SV407	12,8543	S	38,0582 W	SV407	12,9461	S	38,5030 W
SV408	12,7898	S	38,1594 W	SV408	12,9439	S	38,4298 W
SV409	12,8717	S	38,1417 W	SV409	12,9689	S	38,1370 W
SV411	12,8883	S	38,2250 W	SV411	12,8696	S	38,0713 W
SV501	11,7548	S	37,7124 W	SV412	12,8543	S	38,0582 W
SV502	11,7612	S	38,0143 W	SV413	12,7898	S	38,1594 W
SV503	13,5073	S	38,8948 W	SV414	12,8717	S	38,1417 W
SV504	13,9205	S	38,8552 W	SV416	12,8870	S	38,1547 W
SV506	12,8087	S	39,1071 W	SV417	12,8883	S	38,2250 W
SV507	12,3982	S	38,8924 W	SV418	12,9044	S	38,2382 W
SV508	12,5528	S	38,0672 W	SV501	11,7548	S	37,7124 W
SV509	13,2156	S	38,6052 W	SV502	11,7612	S	38,0143 W
SV511	12,7434	S	38,7237 W	SV503	13,5073	S	38,8948 W
SV601	12,9514	S	38,3478 W	SV504	13,9205	S	38,8552 W
SV602	13,0255	S	38,4803 W	SV506	12,8087	S	39,1071 W
SV603	13,0244	S	38,5364 W	SV507	12,3850	S	38,9001 W
SV604	13,0064	S	38,6489 W	SV508	12,5528	S	38,0672 W
SV606	12,8834	S	38,6216 W	SV509	13,2156	S	38,6052 W
SV607	12,8501	S	38,7417 W	SV511	12,7434	S	38,7237 W
SV608	12,8370	S	38,3876 W	SV601	12,9612	S	38,3750 W
SV609	12,6952	S	38,4986 W	SV602	13,0255	S	38,4803 W
SV611	13,2776	S	38,9298 W	SV603	13,0244	S	38,5364 W
SV612	12,8658	S	38,2548 W	SV604	13,0064	S	38,6489 W
SV613	12,6585	S	38,0596 W	SV606	12,8834	S	38,6216 W
SV701	12,9176	S	38,3708 W	SV607	12,8501	S	38,7417 W
SV702	12,8469	S	38,4389 W	SV608	12,8369	S	38,3878 W
SV703	12,8368	S	38,3879 W	SV609	12,6952	S	38,4986 W
SV704	12,8173	S	38,2927 W	SV611	13,2776	S	38,9298 W
SV706	12,8072	S	38,2429 W	SV612	12,8635	S	38,2559 W
SV707	12,8988	S	38,2751 W	SV613	12,6585	S	38,0596 W
SV708	12,7733	S	38,0770 W	SV701	12,9332	S	38,3811 W
SV709	12,9726	S	38,2065 W	SV702	12,9150	S	38,2861 W
SV711	12,9829	S	38,2578 W	SV703	12,9965	S	38,2676 W
SV712	12,9937	S	38,3072 W	SV704	12,9857	S	38,2209 W
SV713	13,0028	S	38,3532 W	SV706	13,0260	S	38,4138 W
SV714	13,0127	S	38,4040 W	SV707	13,0164	S	38,3636 W
SV716	12,3975	S	38,5657 W	SV708	12,8388	S	38,4018 W
SV717	12,3272	S	38,3452 W	SV709	12,8202	S	38,3067 W
SV718	12,3495	S	38,2442 W	SV711	12,8493	S	38,4514 W
SV719	12,0956	S	37,6877 W	SV712	12,8103	S	38,2595 W
SV721	12,5829	S	37,7774 W	SV713	12,9176	S	38,3708 W
SV722	13,8269	S	38,4027 W	SV714	12,8469	S	38,4389 W
SV723	13,7684	S	38,5877 W	SV716	12,8368	S	38,3879 W
SV724	13,7349	S	38,6694 W	SV717	12,8173	S	38,2927 W
SV726	13,1998	S	38,8409 W	SV718	12,8072	S	38,2429 W
SV727	13,1190	S	38,8851 W	SV719	12,8989	S	38,2753 W
SV728	13,0071	S	38,9186 W	SV721	12,7733	S	38,0770 W
SV729	14,2517	S	39,7468 W	SV722	12,9833	S	38,2033 W
-	-		-	SV723	12,9937	S	38,2544 W

WAYPOINT	LATITUDE	LONGITUDE	WAYPOINT	LATITUDE	LONGITUDE
-	-	-	SV724	13,0044 S	38,3080 W
-	-	-	SV726	13,0133 S	38,3504 W
-	-	-	SV727	13,0238 S	38,4003 W
-	-	-	SV728	12,3975 S	38,5657 W
-	-	-	SV729	12,3272 S	38,3452 W
-	-	-	SV731	12,3495 S	38,2442 W
-	-	-	SV732	12,0956 S	37,6877 W
-	-	-	SV733	12,5829 S	37,7774 W
-	-	-	SV734	13,8269 S	38,4027 W
-	-	-	SV736	13,7684 S	38,5877 W
-	-	-	SV737	13,7349 S	38,6694 W
-	-	-	SV738	13,1998 S	38,8409 W
-	-	-	SV739	13,1190 S	38,8851 W
-	-	-	SV741	13,0071 S	38,9186 W
-	-	-	SV742	14,2517 S	39,7468 W

Obs.: Os valores de latitude e longitude em graus.

O cenário proposto 2 possui uma quantidade maior de *waypoints* devido às fases dos procedimentos de saídas inicial e aproximação final, que necessitaram de uma estrutura de rotas que atendessem às pistas paralelas.

A numeração seguiu 4 famílias de waypoints 400, 500, 600 e 700. A família 400 corresponde ao seguimento de aproximação (inicial, intermediário e final). As famílias 500 e 600 correspondem aos segmentos de chegada (anterior ao limite da TMA) e corredores visuais, respectivamente. A família 700 corresponde aos demais segmentos de saída e chegada (dentro da TMA).

D.2 CONFIGURAÇÃO DE APROXIMAÇÃO

A partir de 2005, a ICAO adotou o conceito de procedimentos RNAV (GNSS) em configuração “T” ou “Y”. Esta configuração permite a criação de regiões de captura, ou seja, regiões mais favoráveis de ingresso da aeronave no procedimento de aproximação.

É constituída de 3 fixos iniciais com a finalidade de estabelecer aproximações contínuas logo após a finalização de uma STAR, sem a necessidade de esperas (órbitas) que constituem procedimentos de reversão (Figura D.4).

A diferença entre um procedimento com configuração em “T” e “Y” está nos ângulos que os segmentos iniciais laterais fazem com o segmento intermediário. Quando o ângulo formado for de 90° , o procedimento será em “T”, caso contrário, variando de 90° até 70° , será em “Y”.

Este estudo adotou a configuração em “T”, pois permite melhor adequação aos conceitos de circulação aérea em área terminal.

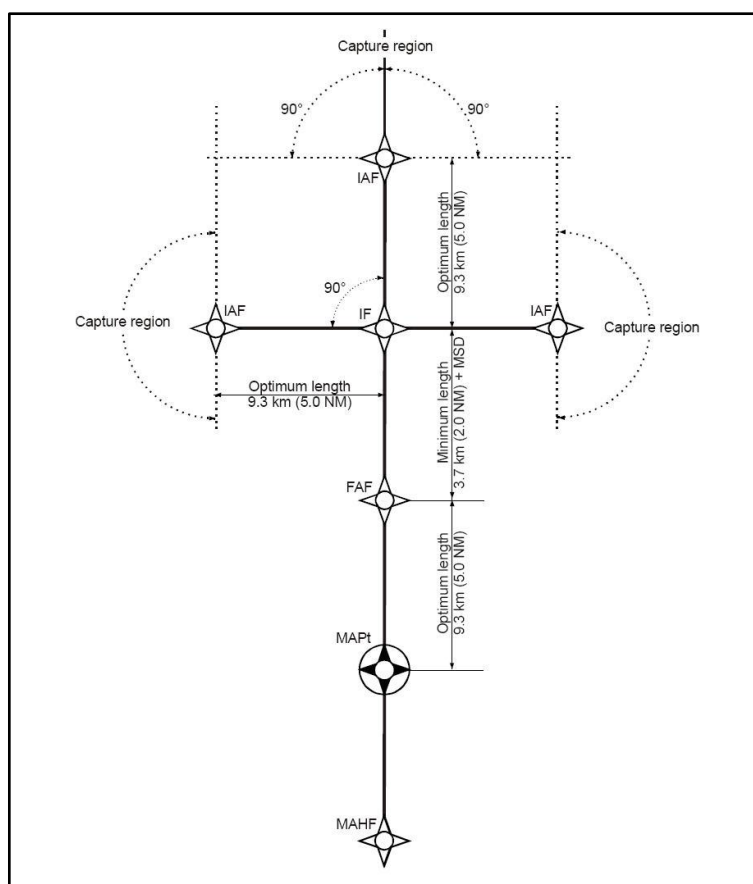
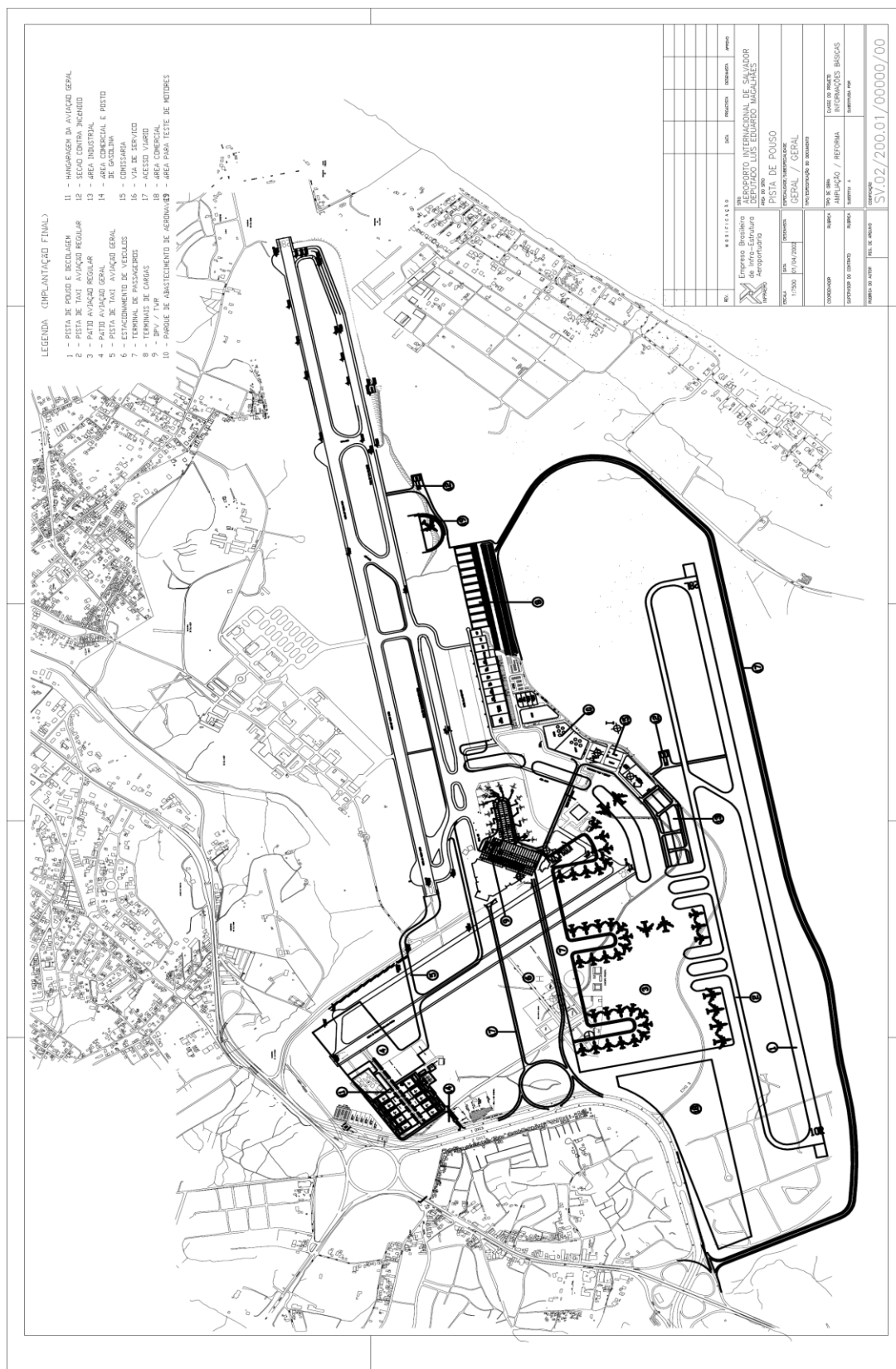


Figura D.4 – Configuração em “T” em procedimento RNAV.
Fonte: ICAO [12].

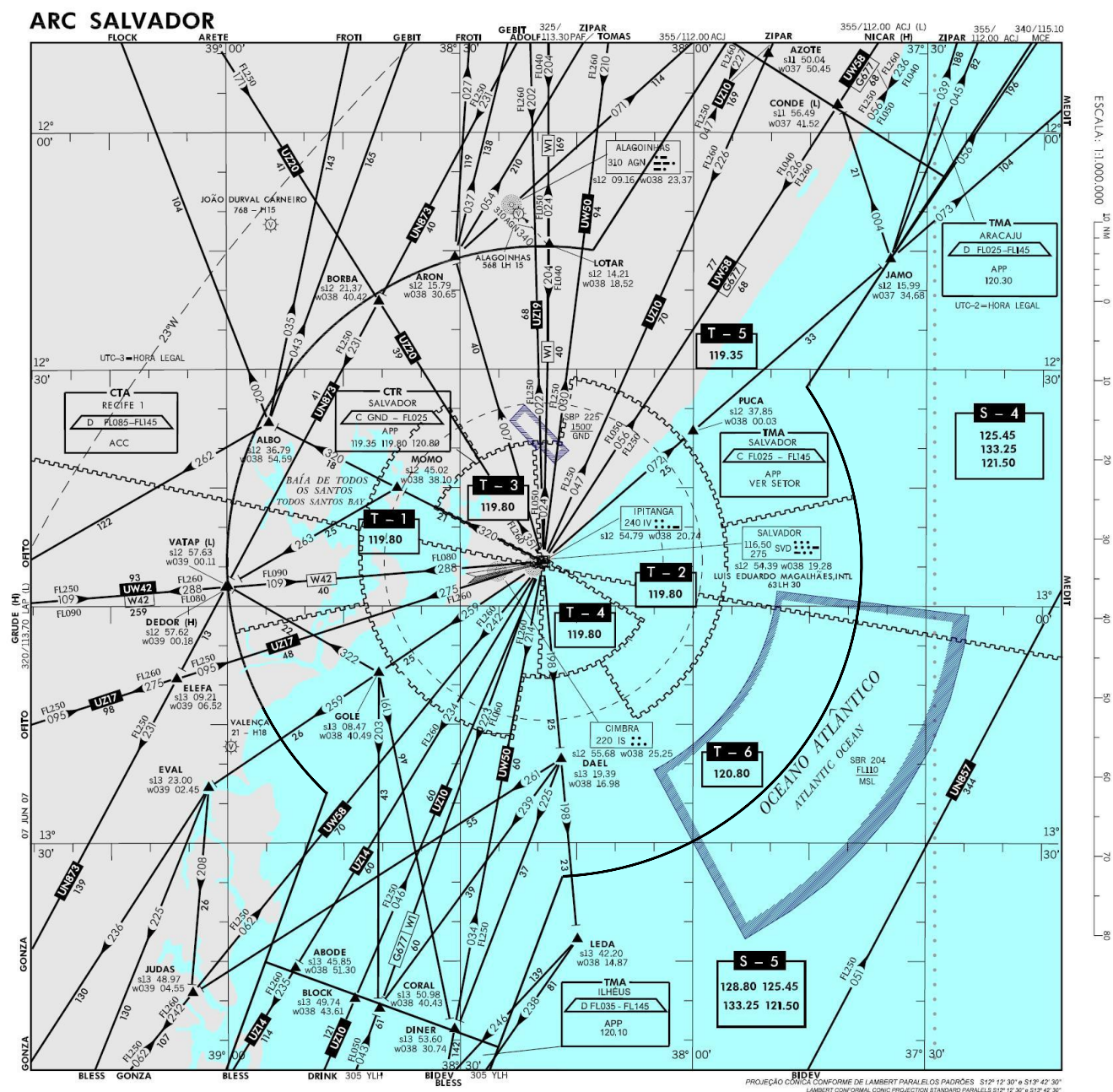
PROJETO DE AMPLIAÇÃO DO AEROPORTO DE SALVADOR



Fonte: INFRAERO [2].

ANEXO II

ÁREA DE CONTROLE TERMINAL DE SALVADOR



Fonte: DECEA [3].

ANEXO IV

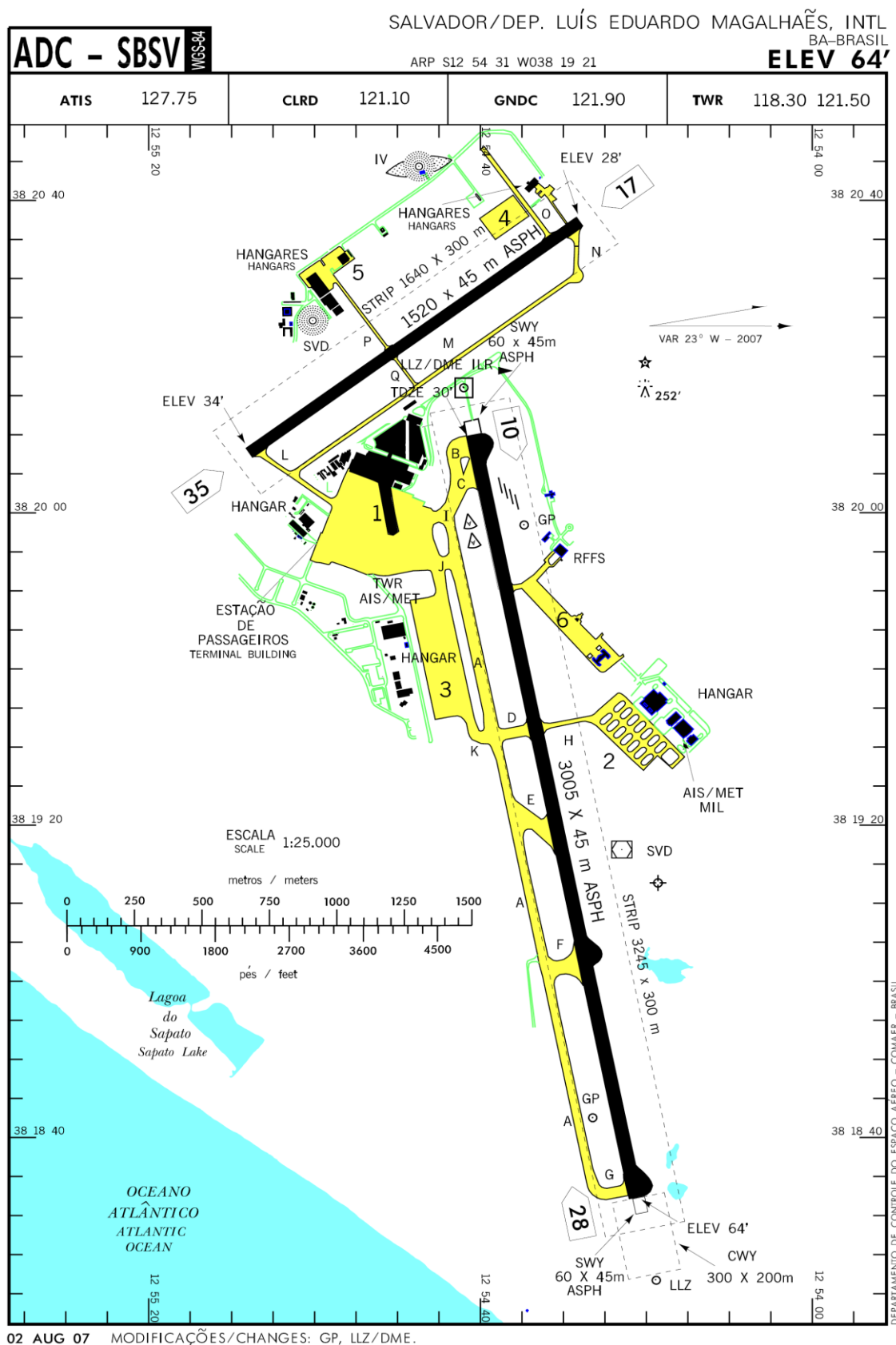
PROCEDIMENTOS DE NAVEGAÇÃO AÉREA DA TMA-SV

TIPO	NOME	PISTA
CHEGADA (STAR)	MARE	10
	KARE	28
	IPIT	28
	BONF	10
	AMAN	10
APROXIMAÇÃO (IAP)	RADAR RWY 10	10
	RADAR RWY 17	17
	RADAR RWY 28	28
	RADAR RWY 35	35
	ILS X RWY 10	10
	ILS Y RWY 10	10
	ILS Z RWY 10	10
	ILS Y RWY 28	28
	ILS Z RWY 28	28
	VOR OU VOR/DME Y RWY 10	10
	VOR/DME RWY 28	28
	NDB Z RWY 10	10
	NDB Y RWY 10	10
	NDB RWY 17	17
	NDB RWY 28	28
	RNAV (GNSS) RWY 28	28
	VOR/DME Z RWY 10	10
SAÍDA (SID)	ADOLF	TODAS
	AZOTE	TODAS
	BORBA	TODAS
	CONDE	TODAS
	LOTAR	TODAS
	TOMAS	TODAS
	ABODE	10 ou 17
	CORAL	10 ou 17
	DEDOR	10 ou 17
	DINER	10 ou 17
	ELEFA	10 ou 17
	JUDAS	10 ou 17
	GOLE	TODAS
	ARON	TODAS
	PUCA	TODAS
	ABODE 1	28 ou 35
	CORAL 1	28 ou 35
	DEDOR 1	28 ou 35
	DINER 1	28 ou 35
	ELEFA 1	28 ou 35
	JUDAS 1	28 ou 35
	MOMO	28 ou 35
	DAEL	28 ou 35
REA (CORREDOR VISUAL)	FORTE	TODAS
	AXEH	TODAS
	BONFIM	TODAS
	CAIXA-PREGOS	TODAS
	FRADE	TODAS
VAC	CIRCUITO DE TRÁFEGO	10/28 e 17/35

Fonte: DECEA [3].

ANEXO V

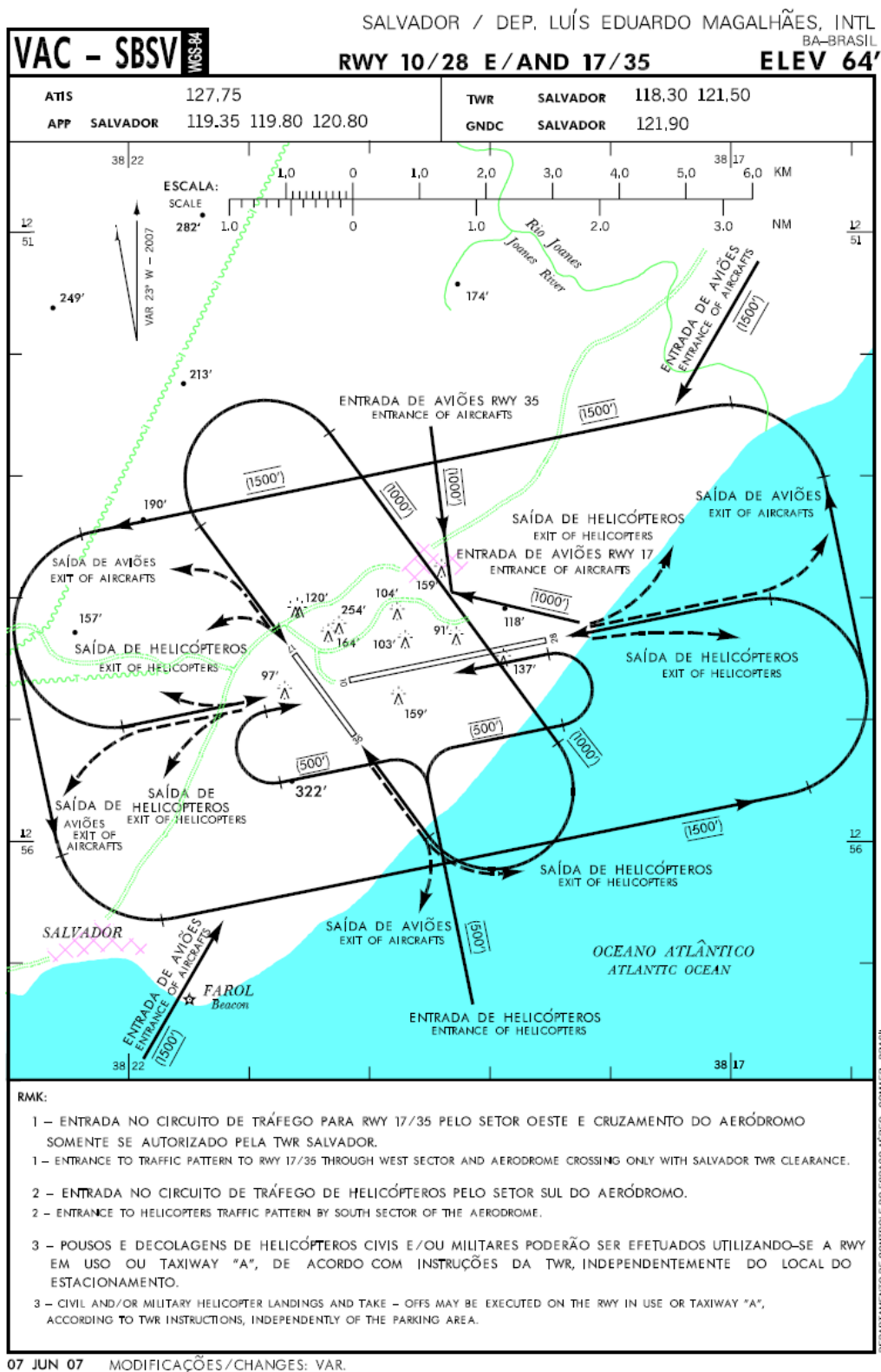
SÍTIO DO AEROPORTO INTERNACIONAL DE SALVADOR



Fonte: DECEA [3].

ANEXO VI

CIRCUITO DE TRÁFEGO DE SALVADOR



ANEXO VII

DADOS COLETADOS DO SGTC ENTRE JAN/2003 E SET/2006 (NÚMERO DE AERONAVES)

ANO	MÊS	DIA	MILITAR	GERAL	REGULAR	TOTAL
2003	JAN	16	1	128	181	310
	FEV	27	81	87	174	343
	MAR	6	98	94	175	367
	ABR	17	21	145	168	334
	MAI	23	7	80	153	240
	JUN	27	32	82	149	263
	JUL	25	17	122	152	291
	AGO	22	28	101	149	278
	SET	19	17	102	145	264
	OUT	19	78	87	135	300
	NOV	21	29	87	151	267
	DEZ	10	69	103	151	323
2004	JAN	23	25	126	170	321
	FEV	25	5	167	187	359
	MAR	2	43	103	178	324
	ABR	20	19	113	196	328
	MAI	27	8	96	166	270
	JUN	8	19	85	218	322
	JUL	30	12	81	178	271
	AGO	29	64	75	155	294
	SET	3	10	117	170	297
	OUT	30	29	85	190	304
	NOV	26	35	122	145	302
	DEZ	29	44	113	173	330
2005	JAN	2	1	158	153	312
	FEV	13	3	197	158	358
	MAR	27	12	123	146	281
	ABR	15	10	98	148	256
	MAI	20	5	94	140	239
	JUN	17	54	91	137	282
	JUL	2	90	54	163	307
	AGO	19	74	91	148	313
	SET	22	35	96	146	277
	OUT	16	50	101	136	287
	NOV	11	43	130	153	326
	DEZ	27	38	121	175	334
2006	JAN	27	28	128	175	331
	FEV	25	6	151	229	386
	MAR	1	9	152	193	354
	ABR	13	15	98	189	302
	MAI	29	22	129	168	319
	JUN	8	27	133	168	328
	JUL	21	11	170	173	354
	AGO	4	12	148	175	335
	SET	14	18	148	177	343

ANEXO VIII

HORAS DE SIMULAÇÃO

Tabela VIII - Horas de Simulação.

2005	ACFT	TEMPO REAL			TEMPO DE SIMULAÇÃO			FATOR MULTIPLICADOR DO TEMPO REAL		
		CA	CP1	CP2	CA	CP1	CP2	CA	CP1	CP2
JAN	312	25:04:00	25:01:00	25:09:00	00:24:27	00:12:26	00:12:10	61,51	120,78	124,00
FEV	358	24:35:38	24:34:36	24:38:32	00:30:43	00:13:48	00:13:31	48,03	106,90	109,32
MAR	281	24:37:40	24:26:31	24:36:57	00:20:22	00:10:26	00:10:46	72,56	140,60	137,17
ABR	256	25:08:23	24:59:31	25:22:26	00:18:03	00:09:33	00:09:42	83,59	157,06	156,85
MAI	239	24:48:42	25:06:35	25:08:00	00:14:29	00:09:04	00:09:27	102,73	166,07	159,44
JUN	282	24:57:00	24:46:31	25:05:26	00:19:40	00:10:03	00:09:59	76,13	147,95	150,89
JUL	307	24:49:56	24:36:32	24:59:26	00:21:02	00:10:14	00:10:18	70,82	144,36	145,58
AGO	313	25:10:54	24:57:31	25:20:26	00:21:57	00:10:30	00:10:30	65,85	142,69	144,86
SET	277	24:08:32	24:09:37	25:19:24	00:19:00	00:09:32	00:10:14	76,26	152,07	148,56
OUT	287	25:32:36	25:07:56	24:09:35	00:18:42	00:10:06	00:09:40	81,95	149,36	149,95
NOV	326	24:24:32	24:16:14	24:17:00	00:24:51	00:11:48	00:11:49	58,92	123,48	123,24
DEZ	334	24:32:36	24:23:31	24:35:20	00:33:05	00:12:25	00:12:24	44,49	117,90	118,92
		297:50:29	296:26:05	298:41:32	4:26:21	2:09:55	2:10:30	70,24	139,10	139,07
		TOTAL	892:58:06		TOTAL	8:46:46		MÉDIA	101,71	

ANEXO IX

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Tabela IX.a - Simulação - Tempo de voo.

TEMPO DE VÔO (MIN)						
ANO 2005	CENÁRIO	VALOR ABSOLUTO (NM)			VALOR RELATIVO (%)	
		ARR	DEP	TOTAL	ARR	DEP
JAN	CA	5.992,26	4.933,99	10.926,24	0,5484	0,4516
	CP1	5.375,94	4.433,44	9.809,38	0,5480	0,4520
	CP2	5.126,08	4.596,48	9.722,56	0,5272	0,4728
FEV	CA	6.333,18	5.301,16	11.634,34	0,5444	0,4556
	CP1	5.493,52	4.760,39	10.258,35	0,5355	0,4641
	CP2	4.979,80	4.764,83	9.740,19	0,5113	0,4892
MAR	CA	5.318,60	4.923,78	10.242,38	0,5193	0,4807
	CP1	4.792,94	4.427,50	9.220,44	0,5198	0,4802
	CP2	4.630,81	4.505,58	9.136,39	0,5069	0,4931
ABR	CA	5.295,95	4.862,54	10.158,49	0,5213	0,4787
	CP1	4.958,85	4.424,64	9.383,49	0,5285	0,4715
	CP2	4.913,90	4.458,91	9.372,80	0,5243	0,4757
MAI	CA	4.969,75	4.512,22	9.481,98	0,5241	0,4759
	CP1	4.665,97	4.112,85	8.778,82	0,5315	0,4685
	CP2	4.644,42	4.133,92	8.778,35	0,5291	0,4709
JUN	CA	5.220,86	5.005,09	10.225,95	0,5105	0,4895
	CP1	4.766,81	4.476,91	9.243,72	0,5157	0,4843
	CP2	4.670,16	4.489,07	9.159,23	0,5099	0,4901
JUL	CA	4.875,21	4.563,03	9.438,24	0,5165	0,4835
	CP1	4.444,59	4.173,59	8.618,17	0,5157	0,4843
	CP2	4.405,55	4.205,10	8.610,64	0,5116	0,4884
AGO	CA	5.385,04	4.671,04	10.056,08	0,5355	0,4645
	CP1	4.958,45	4.225,93	9.184,38	0,5399	0,4601
	CP2	4.847,96	4.243,63	9.091,59	0,5332	0,4668
SET	CA	5.320,46	4.927,15	10.247,60	0,5192	0,4808
	CP1	4.866,15	4.403,10	9.269,25	0,5250	0,4750
	CP2	4.808,17	4.415,24	9.223,41	0,5213	0,4787
OUT	CA	4.318,43	3.785,18	8.103,61	0,5329	0,4671
	CP1	3.811,09	3.385,27	7.196,36	0,5296	0,4704
	CP2	3.690,87	3.428,48	7.119,35	0,5184	0,4816
NOV	CA	6.081,62	5.993,12	12.074,73	0,5037	0,4963
	CP1	5.662,58	5.459,86	11.122,45	0,5091	0,4909
	CP2	5.523,11	5.486,06	11.009,18	0,5017	0,4983
DEZ	CA	6.063,86	5.742,67	11.806,53	0,5136	0,4864
	CP1	5.582,29	5.106,12	10.688,42	0,5223	0,4777
	CP2	5.400,26	5.163,00	10.563,26	0,5112	0,4888

Tabela IX.b - Distância de voo.

DISTÂNCIA DE VÔO (NM)						
ANO 2005	CENÁRIO	VALOR ABSOLUTO (NM)			VALOR RELATIVO (%)	
		ARR	DEP	TOTAL	ARR	DEP
JAN	CA	21.718,10	20.715,70	42.433,80	0,5118	0,4882
	CP1	20.233,04	18.837,16	39.070,20	0,5179	0,4821
	CP2	19.784,88	19.154,72	38.939,60	0,5081	0,4919
FEV	CA	21.466,40	20.257,70	41.724,10	0,5145	0,4855
	CP1	19.635,34	18.401,26	38.036,60	0,5162	0,4838
	CP2	18.917,04	18.810,06	37.727,10	0,5014	0,4986
MAR	CA	20.988,60	20.224,40	41.213,00	0,5093	0,4907
	CP1	19.602,12	18.328,38	37.930,50	0,5168	0,4832
	CP2	19.259,24	18.494,56	37.753,80	0,5101	0,4899
ABR	CA	20.289,20	19.897,60	40.186,80	0,5049	0,4951
	CP1	19.409,00	18.213,80	37.622,80	0,5159	0,4841
	CP2	19.219,02	18.298,08	37.517,10	0,5123	0,4877
MAI	CA	19.459,70	18.119,70	37.579,40	0,5178	0,4822
	CP1	18.660,23	16.603,17	35.263,40	0,5292	0,4708
	CP2	18.514,36	16.658,64	35.173,00	0,5264	0,4736
JUN	CA	19.814,60	19.348,70	39.163,30	0,5059	0,4941
	CP1	18.603,77	17.368,23	35.972,00	0,5172	0,4828
	CP2	18.418,63	17.405,67	35.824,30	0,5141	0,4859
JUL	CA	20.617,20	19.921,80	40.539,00	0,5086	0,4914
	CP1	19.342,69	18.190,41	37.533,10	0,5154	0,4846
	CP2	19.161,47	18.279,83	37.441,30	0,5118	0,4882
AGO	CA	20.103,00	19.142,10	39.245,10	0,5122	0,4878
	CP1	19.041,05	17.353,55	36.394,60	0,5232	0,4768
	CP2	18.777,95	17.401,15	36.179,10	0,5190	0,4810
SET	CA	20.639,40	19.784,50	40.423,90	0,5106	0,4894
	CP1	19.380,00	17.732,00	37.112,00	0,5222	0,4778
	CP2	19.171,13	17.763,87	36.935,00	0,5191	0,4809
OUT	CA	17.415,00	17.019,10	34.434,10	0,5057	0,4943
	CP1	16.015,90	15.286,40	31.302,30	0,5117	0,4883
	CP2	15.762,21	15.381,49	31.143,70	0,5061	0,4939
NOV	CA	22.866,40	22.717,30	45.583,70	0,5016	0,4984
	CP1	21.803,82	20.807,68	42.611,50	0,5117	0,4883
	CP2	21.544,38	20.857,62	42.402,00	0,5081	0,4919
DEZ	CA	23.934,30	21.649,40	45.583,70	0,5251	0,4749
	CP1	22.396,34	20.198,06	42.594,40	0,5258	0,4742
	CP2	21.748,59	20.652,11	42.400,70	0,5129	0,4871

Tabela IX.c - Resolução de conflitos.

RESOLUÇÃO DE CONFLITOS				
2005	Nº ACFT	CA	CP1	CP2
JAN	312	356	263	123
FEV	358	446	344	214
MAR	281	248	142	112
ABR	256	154	101	73
MAI	239	189	118	86
JUN	282	264	195	103
JUL	307	187	118	89
AGO	313	323	227	123
SET	277	305	221	119
OUT	287	266	177	90
NOV	326	358	275	127
DEZ	334	390	299	151

Tabela IX.d - Complexidade do espaço aéreo.

COMPLEXIDADE DE SETORES E CENÁRIOS															
2005	CA					CP1					CP2				
	SETOR 4	SETOR 5	ALIM N	ALIM S	FINAL	SETOR 4	SETOR 5	ALIM N	ALIM S	FINAL	SETOR 4	SETOR 5	ALIM N	ALIM S	FINAL
JAN	2977,70	5144,95	1284,83	3183,32	1402,87	2253,63	4417,78	1160,97	2736,17	1488,50	2120,78	3677,39	967,81	2283,97	1624,32
FEV	4286,24	4474,46	1268,18	4027,68	1646,35	2180,51	3592,06	1245,05	2892,88	2061,22	1217,50	3233,37	894,10	2646,51	2171,49
MAR	3598,86	5542,25	2058,40	2678,10	1392,63	2227,71	4697,68	1330,02	1652,68	1454,01	1277,66	3949,69	989,25	1862,52	1451,83
ABR	4512,30	3624,55	1461,28	2404,61	1422,16	2218,11	3096,02	1452,46	2324,87	1455,24	1396,67	2615,07	1442,50	2228,03	1442,82
MAI	3167,53	3602,13	2137,96	2315,54	1424,06	2594,99	3346,46	1749,42	1523,01	1463,27	1380,82	2429,30	1506,04	1505,26	1444,19
JUN	3131,60	4427,96	1536,92	2646,87	1562,73	2445,27	4325,30	1451,72	2594,28	1672,71	1329,08	4148,08	1123,24	2462,36	1662,73
JUL	2327,94	4175,33	1741,25	2379,71	1427,72	1321,82	3918,14	1427,22	2335,76	1498,98	1314,40	3723,32	1361,33	1569,43	1477,08
AGO	2622,34	4004,41	2500,15	2620,85	1931,25	2377,63	3936,49	2496,64	1746,49	1981,91	2255,94	3346,94	1883,31	1531,31	2043,33
SET	3483,08	3540,06	2027,19	2597,23	1797,06	3476,26	2505,98	1526,67	2380,14	1946,29	2246,56	2440,86	1430,06	1564,29	2028,36
OUT	4856,99	5546,02	1333,66	2511,64	1331,32	2059,49	3854,78	1290,87	1437,72	1356,57	1219,95	3368,24	1024,05	1414,05	1341,73
NOV	4128,17	5909,62	2875,62	2475,29	1476,84	3575,22	3598,81	1928,84	2466,62	1490,49	2351,96	2648,24	1610,43	1642,94	1546,39
DEZ	4336,45	4559,91	2512,37	2540,61	1571,12	2623,05	3969,42	1607,57	2353,29	1790,46	2459,04	3709,42	1307,86	1638,48	1861,06

Tabela IX.e - Atraso na decolagem.

ATRASSO NA DECOLAGEM (MIN)		
ANO 2005	CENÁRIO	ATRASSO (MIN)
JAN	CA	537,54
	CP1	502,41
	CP2	55,14
FEV	CA	897,01
	CP1	809,01
	CP2	146,78
MAR	CA	256,44
	CP1	233,24
	CP2	24,04
ABR	CA	322,70
	CP1	299,88
	CP2	26,72
MAI	CA	237,97
	CP1	173,95
	CP2	21,95
JUN	CA	847,93
	CP1	738,88
	CP2	32,58
JUL	CA	715,90
	CP1	687,18
	CP2	30,71
AGO	CA	939,56
	CP1	758,04
	CP2	40,94
SET	CA	901,11
	CP1	680,08
	CP2	22,79
OUT	CA	933,68
	CP1	850,37
	CP2	25,49
NOV	CA	965,30
	CP1	872,56
	CP2	57,87
DEZ	CA	986,53
	CP1	894,10
	CP2	57,29

ANEXO X

DADOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO (CD)

Anexo a este estudo, encontra-se um CD contendo todos os dados utilizados na simulação:

1. Movimento de aeronaves do dia pico dos meses de 2005:
 - a. Dados originais oriundos do SGTC;
 - b. Dados do SGTC filtrados (retirados dados com erros de inserção);
 - c. Dados de entrada para o simulador RAMS.
2. Cartas aeronáuticas de Salvador:
 - a. ADC;
 - b. PDC;
 - c. VAC;
 - d. STAR;
 - e. IAC;
 - f. SID;
 - g. ARC;
 - h. ERC;
 - i. FPC.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DM	2. DATA 12 de março de 2009	3. REGISTRO Nº CTA/ITA/DM-005/2009	4. Nº DE PÁGINAS 147f.
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Uma aplicação do conceito de Navegação Baseada em Performance: análise das rotas ATS de Salvador			
6. AUTOR(ES): Alexandre Luiz Dutra Bastos			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Navegação Aérea, PBN, RNAV, RNP, Complexidade, Espaço Aéreo			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Controle de tráfego aéreo; Navegação aérea; Planejamento de aeroportos; Pistas (de pouso e decolagem); Rotas aéreas; Capacidade do sistema de guiamento; Simulação computadorizada; Transportes			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica. Área de Transporte Aéreo e Aeroportos. Orientador: Cláudio Jorge Pinto Alves. Defesa em 13/02/2009. Publicada em 2009.			
11. RESUMO: O aumento do tráfego aéreo nos grandes aeroportos brasileiros, aliado a uma configuração de rede de rotas estabelecida por auxílios à navegação aérea convencionais baseados no solo (VOR, DME, NDB), tem gerado constantes congestionamentos nas áreas de controle terminal e respectivas regiões circunvizinhas. A fim de dirimir estas questões, a ICAO instituiu o conceito de Navegação Baseada em Performance (PBN), objetivando aumentar a capacidade do espaço aéreo e diminuir os custos operacionais. Baseado neste conceito, este trabalho visa analisar as rotas ATS de Salvador de acordo com a futura expansão do seu aeroporto internacional, prevista em plano diretor e na qual é considerada a implantação de pistas paralelas. Os efeitos no tráfego aéreo de Salvador são aqui analisados confrontando três cenários modelados: (a) a configuração atual da rede de rotas considerando as pistas convergentes existentes nesse aeroporto; (b) a configuração atual de pistas com uma estrutura de rotas PBN e (c) uma estrutura de rotas PBN numa possível configuração de pistas paralelas. Neste contexto são adotadas métricas de tempo e distância de voo, resolução de conflito, tempo de atraso nas decolagens e complexidade do espaço aéreo. O RAMS PLUS é utilizado como ferramenta de simulação computacional <i>fast-time</i> para esta análise de espaço aéreo.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO() RESERVADO() CONFIDENCIAL() SECRETO			