Ítalo Romani de Oliveira

**ANÁLISE DE RISCO DA OPERAÇÃO DE
ESPAÇAMENTO TEMPORAL
AEROTRANSPORTADO POR MEIO DE UM
MODELO EM REDE DE PETRI ESTOCÁSTICA E
DINAMICAMENTE COLORIDA**

São Paulo

2007

Ítalo Romani de Oliveira

**ANÁLISE DE RISCO DA OPERAÇÃO DE
ESPAÇAMENTO TEMPORAL
AEROTRANSPORTADO POR MEIO DE UM
MODELO EM REDE DE PETRI ESTOCÁSTICA E
DINAMICAMENTE COLORIDA**

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em
Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas Digitais

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Sérgio Cugnasca

São Paulo

2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de junho de 2007

Autor

Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Ítalo Romani de

Análise de risco da operação de espaçamento temporal aerotransportado por meio de um modelo em rede de Petri estocástica e dinamicamente colorida / Ítalo Romani de Oliveira. – São Paulo, 2007.

214 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

**1. Análise de risco 2. Redes de petri 3. Tráfego aéreo
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t**

Dedico este trabalho a meus pais, Marisa e Tarciso.

AGRADECIMENTOS

A elaboração do presente trabalho foi amplamente impulsionada pelo apoio do Orientador, o Professor Paulo Sérgio Cugnasca, e dos Professores João Batista Camargo Jr. e Jorge Rady de Almeida Jr., do Grupo de Análise de Segurança.

É muito importante dizer que o estudo de caso deste trabalho e todo o ferramental matemático necessário para sua elaboração se devem à inestimável colaboração dos colegas do NLR (National Aerospace Laboratory, Amsterdã), a começar por Henk Blom, que desde o início do ano de 2004 ofereceu apoio, e que foi fonte de conhecimento, visão de pesquisa e comprometimento com as metas; a Bert Bakker, que auxiliou nas mais intrincadas questões de manipulação e implementação de ferramentas matemáticas; a Peter Hoogers, que colaborou para o aperfeiçoamento do software de simulação; e aos colegas Sybert Stroeve, Bart Klein Obbink, Mariken Everdij, Margriet Klompstra e Hans de Jong, por inúmeros favores prestados e a alegre convivência durante o período de estágio no NLR.

O caminho percorrido para estabelecimento dos objetivos deste trabalho, e para uma compreensão mais profunda dos aspectos de modelagem de tráfego aéreo, foi trilhado com a valiosa ajuda dos estudantes de graduação. Entre eles, Rubens Ramires Fonseca e Jobson Martins da Silva, que enfrentaram o desafio de realizar, a partir do zero, um software de simulação de tráfego aéreo em tempo acelerado, do estagiário Vitor Pereira Spachi, que contribuiu para aumentar consideravelmente o realismo do modelo, dos estagiários Rafael Anicet Zanini e Pedro Henriques, que refinaram em muito o modelo e incorporaram características tecnológicas avançadas de comunicação ao modelo e ao software; dos estagiários Miriam Yokoyama e Gabriel Porto, que elaboraram cenários realistas do espaço aéreo brasileiro, e realizaram simulações importantes para a compreensão dos aspectos relacionados à detecção e resolução de conflito em tráfego aéreo; e também do estagiário Renato Matuzaki Honda, que realizou exaustivas operações de execução de simulações e processamento de resultados, que são apresentados nos Capítulos 7 e 8 deste trabalho, e ainda auxiliou na elaboração do Apêndice B.

A realização deste trabalho foi viabilizada pelas bolsas fornecidas, em diferentes fases, pela FDTE (Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia), pela RNP (Rede

Nacional de Pesquisas), por intermédio da FUSP (Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo), e da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), que custeou o período de estágio no NLR em Amsterdã.

Às pessoas que viram o trabalho em suas muitas fases, nos dias de angústia e nos dias de euforia, lado a lado com o autor, hora após hora, dia após dia ao longo destes três anos e meio, apoiando e incentivando em nossa sala, meu mais sincero e amplo agradecimento: Alan, Danilo, Gilberto, Lúcio e Ricardo.

Por fim, a quem encarnou em pessoa toda essa grande corrente de apoio e incentivo, acrescentando seu amor sem limites: a minha querida Glorinha.

RESUMO

A segurança do espaço aéreo pode aumentar consideravelmente com o uso de operações de espaçamento e separação aerotransportados. Sob este paradigma, a tarefa de manter distância em relação a outras aeronaves é delegada aos pilotos, que contarão com o Sistema de Assistência de Separação Aerotransportado (ASAS). Com este sistema, ainda em fase experimental, os pilotos tornam-se cientes dos riscos do tráfego circundante com até 15 minutos de antecedência, sem necessitar de auxílio dos controladores de tráfego aéreo. Esta antecedência é muito maior que a do atual sistema anti-colisão (TCAS), que é de menos de 1 minuto. O sistema ASAS utiliza uma tecnologia de comunicação mais avançada que a tecnologia do *transponder* modo C, utilizado atualmente pelo sistema anti-colisão. O novo sistema ASAS está sendo desenvolvido intensivamente no Eurocontrol e em outras iniciativas nos Estados Unidos da América, e funcionará em conjunto com o atual sistema anti-colisão, proporcionando redundância, ou seja: se o antigo sistema falhar, o novo ainda pode emitir um alerta, ou vice-versa. O presente trabalho de pesquisa aborda a aplicação do ASAS para aumentar a precisão do espaçamento entre aeronaves que chegam sequencialmente a um determinado aeroporto, por meio de um formalismo matemático denominado “Rede de Petri Estocástica e Dinamicamente Colorida”, com a obtenção de dados quantitativos sobre o risco de acidente. Esses dados indicam que o risco de acidente é significativamente menor com o uso do ASAS do que sem o uso do ASAS.

Palavras-chave: Análise de Risco. Redes de Petri. Tráfego Aéreo. Simulação. ASAS.

ABSTRACT

The safety in the airspace can considerably increase with the use of airborne spacing and separation operations. Under this paradigm, the task of maintaining a safe distance between aircraft is delegated to the pilots, which will be supported by the Airborne Separation Assistance System (ASAS). With this system, which is still in experimental phase, pilots become aware of the surrounding air traffic risks with up to 15 minutes in advance, without the help of air traffic controllers on the ground. This antecedence is much greater than the one provided by the current Traffic Collision Avoidance System (TCAS). ASAS uses a more advanced communication technology than Mode-C transponder, broadly used in the current civil aviation for collision avoidance purposes. The development of ASAS is being carried out intensively in Eurocontrol and in other initiatives in the United States of America, and this novel system is intended to work in parallel with the current collision avoidance systems, acting as safety nets. The present study approaches the ASAS application to improve the precision of spacing between aircraft that sequentially arrive at an airport, using the so called mathematical formalism “Stochastically and Dynamically Coloured Petri Net”, for evaluating quantitative data about accident risk. These data indicate that the accident risk is significantly smaller when aircraft pairs use ASAS Spacing than when aircraft pairs do not use ASAS Spacing.

Keywords: Risk Analysis. Petri Nets. Air Traffic. Simulation. ASAS.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
SUMÁRIO.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	17
1 Introdução	20
1.1 Objetivo	22
1.2 Justificativa.....	24
1.3 Organização do Trabalho	25
2 Estado da Arte em Sistemas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo	27
2.1 Introdução aos Sistemas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo.....	27
2.1.1 Frente Administrativa do Transportador Aéreo	27
2.1.2 Frente Administrativa da Autoridade Aeronáutica	28
2.1.3 Estratégia e Tática em Gerenciamento de Tráfego Aéreo.....	28
2.1.4 Visão Geral do Sistema de Controle de Tráfego Aéreo	29
2.1.5 Visão Geral do Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo.....	32
2.2 Sistemas de Automação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo	34
2.2.1 Sistema de Automação de Tráfego Aéreo dos Estados Unidos da América - CTAS.....	34
2.2.2 Algumas Ferramentas Européias para Gerenciamento de Tráfego Aéreo	41
2.2.3 Sistema de Assistência de Separação Aerotransportado (ASAS)	43
2.3 Considerações Finais deste Capítulo.....	45
3 Modelagem de Sistemas de Tráfego Aéreo	46
3.1 Riscos do Tráfego Aéreo.....	46
3.1.1 Histórico e Classificação dos Acidentes Aeronáuticos	46
3.1.2 Acidentes Relacionados com Ausência de Separação Mínima entre Aeronaves	49
3.1.3 Níveis-Alvo de Segurança.....	50
3.2 Malha de Controle Existente de Tráfego Aéreo	50
3.2.1 Plano Inicial de Voo	53
3.2.2 Alterações no Plano de Voo	53
3.3 Uma Proposta para Futura Malha de Controle de Tráfego Aéreo.....	55
3.4 Reprogramação Dinâmica de Trajetórias	58
3.5 Impacto do Atraso da Execução de Manobras nos Ciclos de Detecção e Resolução de Conflito.....	60
3.6 Modelo Físico da Aeronave	63
3.7 Ferramentas de Simulação de Detecção e Resolução de Conflito	63
3.7.1 Ferramentas Existentes com Alto Grau de Maturidade	65
3.7.2 Resolução de Conflito Baseada em Regras.....	72
3.7.3 Eficiência da Resolução de Conflito	75
3.8 Considerações Finais deste Capítulo.....	75

4	O Impacto da Tecnologia nas Características do Tráfego Aéreo	76
4.1	Análise de Desempenho de Tráfego Aéreo.....	76
4.1.1	Análise do Desempenho de CNS / ATM	76
4.1.2	Análise de Desempenho de Resolução de Conflito	79
4.1.3	Análise do Desempenho de LDRR (Limited Dynamic Re-Routing).....	80
4.1.4	Análise do Desempenho da Densidade Dinâmica (DD) e das Métricas de Complexidade.....	84
4.1.5	Análise do Desempenho da Inferência Bayesiana	88
4.1.6	Análise do Desempenho do ASAS.....	90
4.2	Análise de Risco em Novos Sistemas de ATM.....	92
4.2.1	Áreas de Aplicação da Metodologia TOPAZ	93
4.3	Considerações Finais do Capítulo	94
5	Modelo Funcional Utilizado para Identificação de Perigos e Análise de Risco.....	95
5.1	Malha de Controle de Tráfego Aéreo.....	95
5.2	Algumas Responsabilidades dos Operadores Humanos	96
5.3	Operações de Espaçamento ASAS.....	96
5.3.1	Intercalação ASAS	97
5.3.2	Permanência em Trilha ASAS	100
5.4	Benefícios dos Procedimentos de Espaçamento ASAS	101
5.5	Alguns Aspectos Técnicos do Espaçamento Aerotransportado.....	102
5.6	Detalhamento Técnico da Aplicação em Estudo.....	104
5.6.1	Operação Considerada e Escopo da Análise de Risco	104
5.6.2	Descrição da Operação de Permanência em Trilha do ASAS	104
5.6.3	Papéis e Responsabilidades dos Operadores Humanos.....	106
5.6.4	Equipamento Requerido para as Aeronaves.....	107
5.6.5	Desempenho das Aeronaves.....	107
5.6.6	Elementos Funcionais do Ambiente ASAS	108
5.6.7	Diferenças entre o conceito operacional aqui utilizado e o conceito operacional a ser implementado	110
5.7	Identificação dos Perigos e Tópicos de Segurança	110
5.7.1	Análise Operacional de Perigos	111
5.7.2	COSPACE HAZOP.....	114
5.7.3	Fase Qualitativa da Metodologia TOPAZ.....	116
5.8	Considerações Finais do Capítulo	117
6	Modelo Formal da Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado.....	118
6.1	Introdução à Modelagem Formal da Aplicação por meio de Redes de Petri	118
6.1.1	Rede de Petri Básica.....	118
6.1.2	Rede de Petri de Tempo	121
6.1.3	Arcos Habilitadores e Arcos Inibidores	125
6.2	Descrição do Modelo em Rede de Petri Estocástica e Dinamicamente Colorida (SDCPN)	127
6.2.1	Definição de SDCPN	127
6.2.2	Introdução ao Uso de uma SDCPN em uma Aplicação de Gerenciamento de Tráfego Aéreo	129
6.2.3	Modelagem de Fatores Humanos	132
6.3	Especificação da SDCPN Para a Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado	134
6.3.1	Modelo de Agentes.....	134
6.3.2	Redes de Petri Locais	136
6.4	Implementação da SDCPN em Código de Simulação	157

6.5	Considerações Finais do Capítulo	157
7	Cálculo do Risco da Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado.....	158
7.1	Cálculo do Risco	158
7.1.1	O Método Monte Carlo	158
7.1.2	Aceleração do Método Monte Carlo	159
7.2	Estabelecimento dos Critérios de Filtragem do IPS a Serem Aplicados Neste Estudo de Caso	166
7.3	Resultados Básicos da Simulação Monte Carlo	169
7.4	Avaliação de Tendência e Incerteza	170
7.5	Considerações Finais do Capítulo	173
8	Análise das Possíveis Causas de Colisão Encontradas nas Simulações	176
8.1	Análise das Velocidades, Altitudes e Instantes de Colisão das Aeronaves	177
8.1.1	Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 60 s	177
8.1.2	Análise dos Casos de Espaçamento Requerido Igual a 45 s	184
8.2	Análise de Execução do Procedimento de Espaçamento Temporal Aerotransportado.....	190
8.2.1	Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 60 s	190
8.2.2	Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 45 s	192
8.3	Análise de Ações de Detecção e Resolução de Conflito.....	194
8.3.1	Análise dos Casos de Espaçamento Requerido Igual a 60 s	194
8.3.2	Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 45 s	197
8.4	Árvores de Falhas.....	198
8.5	Considerações Finais Sobre o Capítulo.....	200
9	Conclusão	202
9.1	Comentários Finais Sobre o Conteúdo Apresentado Neste Trabalho	202
9.2	Propostas de Trabalhos Futuros	204
9.3	Consideração Final	206
10	Referências Bibliográficas	207
Apêndice A.	Alguns Aspectos Técnicos da Dinâmica das Aeronaves.....	215
Apêndice B.	Algoritmo Sistema de Partículas Interagentes.....	229
Apêndice C.	Detalhamento da Avaliação de Tendência e Incerteza Sobre Os Valores de Risco Obtidos em Simulações	239

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1-1: Tendência mundial de aumento do tráfego regular de passageiros (ICAO, 2004; ICAO, 2006).	21
Fig. 1-2: Tendência mundial de aumento do tráfego regular de carga (ICAO, 2004; ICAO, 2006).	21
Fig. 2-1: Divisão geográfica do ATCS brasileiro em FIRs e seus setores (NCAG 2, 2004).	30
Fig. 2-2: TMA São Paulo, dividida em setores internos (NCAG 2, 2004).	31
Fig. 2-3: Organização do Sistema de Controle de Tráfego Aéreo (ATCS).	32
Fig. 2-4: Modelo do ATMS.	33
Fig. 2-5: Divisão do espaço aéreo dos EUA (CTAS, 2003).	35
Fig. 2-6: Interface da ferramenta <i>Direct-To</i> (CTAS, 2003).	37
Fig. 2-7: Contexto de funcionamento do CTAS (CTAS, 2003).	38
Fig. 2-8: Referências utilizadas pela ferramenta TMA-SC do CTAS para gerenciar chegadas em aeroportos nos EUA (CTAS, 2003).	40
Fig. 2-9: Alerta de pico de tráfego fornecido pelo TMA-SC. À esquerda e à direita está exibida a seqüência de vôos chegando ao aeroporto (CTAS, 2003).	40
Fig. 3-1: Número de acidentes fatais a cada 100 mil horas de vôo, em tráfego de vôos regulares (ICAO, 2005).	47
Fig. 3-2: Número de fatalidades de passageiros a cada 100 milhões de passageiros-quilômetro, em tráfego de vôos regulares (ICAO, 2005).	47
Fig. 3-3: Distribuição dos grupos de fatores causais de acidentes relacionados com o gerenciamento de tráfego aéreo (VAN ES, 2003).	48
Fig. 3-4: Ocorrência de acidentes por fase de vôo, considerando (VAN ES, 2003).	48
Fig. 3-5: Estatísticas de acidentes relacionados com perda de separação entre aeronaves e de aeronaves com veículos terrestres (BLOM, 2004).	49
Fig. 3-6: Malha de controle existente de controle de tráfego aéreo, adaptada de Hansman et al. (1997).	51
Fig. 3-7: Volume de proteção da aeronave A, considerando espaço aéreo de cruzeiro.	54
Fig. 3-8: Malha de controle proposta para futuras gerações de sistemas de controle de tráfego aéreo.	56
Fig. 3-9: Ferramentas avançadas de suporte à decisão, conforme Erzberger (2004).	56
Fig. 3-10: Fluxograma do processo de reprogramação de trajetórias, elaborado a partir da proposta de Erzberger (2004).	58
Fig. 3-11: Detecção de conflito devido a velocidades diferentes das aeronaves.	60
Fig. 3-12: Estado previsto de conflito.	61
Fig. 3-13: Manobra de ultrapassagem para solucionar conflito.	62
Fig. 3-14: Atraso de realização da alteração de trajetória e conseqüentes regiões de conflito, indicadas pelos segmentos espessos.	62
Fig. 3-15: Blocos básicos de modelos de detecção e resolução de conflito (ODONI et al., 1997).	64
Fig. 3-16: Detecção de conflito baseada em regras.	73
Fig. 4-1: Comparação entre diferentes sistemas de rotas.	79
Fig. 4-2: Rede Bayesiana para Tomada de Decisão de Fluxo de Tráfego Aéreo (PEPPER, MILLS, WOJCIK, 2003).	90

Fig. 4-3: Espaço aéreo escolhido para estudo do desempenho do ASAS (PURVES, VERGNE, 2005).....	91
Fig. 5-1: Malha de controle assumida para estudo.	95
Fig. 5-2: Exemplo de ‘Intercalar’, envolvendo duas aeronaves.	98
Fig. 5-3: Ilustração do significado de d_{erro}	99
Fig. 5-4: CDTI em uma operação ‘Intercalar’ com duas aeronaves.....	100
Fig. 5-5: Exemplo da operação ‘Permanecer em Trilha’ com duas aeronaves.	101
Fig. 5-6: CDTI para uma operação ‘Permanecer em Trilha’, que envolve duas aeronaves...	102
Fig. 5-7: Tela do ATCo com indicação das aeronaves sob Espaçamento Aerotransportado.	103
Fig. 5-8: Elementos funcionais das aplicações de Espaçamento Aerotransportado.....	109
Fig. 6-1: Exemplo de grafo simples.	119
Fig. 6-2: Exemplo de grafo bipartite.	119
Fig. 6-3: Elementos básicos de uma rede de Petri e um exemplo simples que representa o funcionamento de um motor.	120
Fig. 6-4: Regras para disparo em uma transição continuamente habilitada a partir do instante $\tau_{0,k}$	121
Fig. 6-5: Ilustração de um sistema de intersecção rodo-ferroviária em nível.....	122
Fig. 6-6: Uma rede de Petri representando um controle de intersecção rodo-ferroviária em nível, no estado inicial.	123
Fig. 6-7: Uma rede de Petri representando um controle de intersecção rodo-ferroviária em nível, no estado em que o trem está na região de <i>Aproximação</i>	124
Fig. 6-8: Emprego dos arcos habilitadores e inibidores na rede de Petri do controle de intersecção rodo-ferroviária em nível.	126
Fig. 6-9: Elementos de uma SDCPN.....	129
Fig. 6-10: Redes de Petri Locais para o exemplo de operação aeronáutica.	130
Fig. 6-11: Rede de Petri composta para o exemplo de operação aeronáutica.	131
Fig. 6-12: Agentes da Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado.....	135
Fig. 6-13: LPNs do Agente Aeronave.	137
Fig. 6-14: LPNs do Comportamento de Controle da Aeronave, parte do agente GNC.	138
Fig. 6-15: Estimativa de erro dentro da malha de controle da aeronave.	141
Fig. 6-16: LPNs de Processamento de Posição e Velocidade do GNC.....	142
Fig. 6-17: LPNs de Comunicação da Aeronave.	143
Fig. 6-18: LPNs do Agente ASAS.	144
Fig. 6-19: LPNs do Agente Piloto Operador.	146
Fig. 6-20: LPN do Agente Piloto Monitorador.	148
Fig. 6-21: Integração de LPNs relacionadas com o controle da aeronave.	150
Fig. 6-22: Integração de LPNs relacionadas com o ASAS.	151
Fig. 6-23: Estimativa de erro dentro da malha de controle da aeronave.	152
Fig. 6-24: LPNs de comunicação do agente ATS.	152
Fig. 6-25: LPN do Sistema de Navegação por Satélite.	153
Fig. 6-26: LPNs relacionadas ao sistema de vigilância ATS.	154
Fig. 6-27: LPNs do agente ATCo Tático.....	155
Fig. 6-28: Integração da Comunicação entre ATCo e Tripulação.....	156
Fig. 7-1: Filtragens no Sistema de Partículas Interagentes.....	160
Fig. 7-2: Cenários separados e sobrepostos para ilustração do IPS.....	161
Fig. 7-3: Dez cenários no instante inicial $t_i = 0$	162
Fig. 7-4: Primeiro estágio de filtragem do IPS.....	163
Fig. 7-5: Replicação de partículas após a aplicação do Filtro 1 do IPS.	164
Fig. 7-6: Segundo estágio de filtragem do IPS.....	164

Fig. 7-7: Processo total de filtragem em três estágios do IPS.	166
Fig. 7-8: Erro da posição lateral da aeronave em relação à trajetória nominal.	166
Fig. 7-9: Resultados de execuções do algoritmo IPS e evolução da média de seus valores. .	169
Fig. 7-10: Resultados do conjunto-base de simulações Monte Carlo.....	170
Fig. 7-11: Ilustração dos conceitos de tendência e incerteza.....	172
Fig. 7-12: Representação gráfica dos intervalos de confiança obtidos na avaliação de tendência e incerteza.	173
Fig. 8-1: Histogramas de velocidades iniciais e finais das aeronaves, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{s}$	178
Fig. 8-2: Histogramas de altitudes finais das aeronaves, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	180
Fig. 8-3: Histograma conjunto das velocidades e altitudes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	181
Fig. 8-4: Histograma dos instantes de colisão, em minutos, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	182
Fig. 8-5: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave líder com os instantes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	182
Fig. 8-6: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave seguidora com os instantes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	183
Fig. 8-7: Distribuição conjunta da velocidade relativa entre aeronaves seguidora e líder com os instantes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	183
Fig. 8-8: Histogramas de velocidades iniciais e finais das aeronaves, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	185
Fig. 8-9: Histogramas de altitudes finais das aeronaves, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	186
Fig. 8-10: Histograma conjunto das velocidades e altitudes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	187
Fig. 8-11: Histograma dos instantes de colisão, em minutos, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	187
Fig. 8-12: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave líder com os instantes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	188
Fig. 8-13: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave seguidora com os instantes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	189
Fig. 8-14: Distribuição conjunta da velocidade relativa entre aeronaves seguidora e líder com os instantes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	189
Fig. 8-15: Utilização do ASAS para o espaçamento temporal entre aeronaves, considerando $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	191
Fig. 8-16: Ampliação gráfica de duas séries da Fig. 8-16.	191
Fig. 8-17: Utilização do ASAS para o espaçamento temporal entre aeronaves, considerando $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	193
Fig. 8-18: Recebimento de instruções e execução de resolução de conflito nas aeronaves seguidoras, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	195
Fig. 8-19: Distâncias entre aeronaves percebidas pelo ATCo, no primeiro instante em que o conflito é detectado, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	196
Fig. 8-20: Recebimento de instruções e execução de resolução de conflito nas aeronaves seguidoras, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	197
Fig. 8-21: Distâncias entre aeronaves percebidas pelo ATCo, no primeiro instante em que o conflito é detectado, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{ s}$	198
Fig. 8-22: Árvore de eventos que causam colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{ s}$	199

Fig. 8-23: Árvore de eventos que causam colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.....	200
Fig. A-1: Malha básica de controle da aeronave.	217
Fig. A-2: Malha de controle da aeronave seguidora com o ASAS.....	220

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Estatísticas de acidentes na aviação comercial (BLOM, 2004).	49
Tabela 3-2: Informações básicas de um plano de voo.	53
Tabela 3-3: Informações na etiqueta de identificação da aeronave.	61
Tabela 3-4: Usuários do RAMS em novembro de 2006 (fonte: Sítio Web http://www.ramsplus.com)	68
Tabela 3-5: Temporização do ciclo de detecção e resolução de conflito baseada em regras.	74
Tabela 4-1: Resultados de consumo de combustível e emissão de gases para as modernizações do gerenciamento do tráfego aéreo (CHIN, MELONE, 1999).	78
Tabela 4-2: Comparação de possíveis diminuições de custo, decorrente da execução de rotas mais diretas (HOWELL, BENNET, BONN, 2003).	80
Tabela 4-3: Resultados gerais de desempenho dos vãos	83
Tabela 4-4: Impactos no provedor de ATS: Conflitos e Carga de Trabalho	84
Tabela 4-5: Coeficientes da Equação de Regressão de DD e DD' (KOPARDEKAR, MAGYARITS, 2003).	86
Tabela 4-6: Importância operacional dos fatores da DD , atribuída pelos controladores (MASALONIS, CALLAHAM, WANKE, 2003).	88
Tabela 4-7: Relação das áreas de aplicação da metodologia TOPAZ e as respectivas ferramentas de suporte.	93
Tabela 5-1: Equipamentos utilizados na operação ASAS em estudo.	107
Tabela 5-2: Perigos identificados para a operação 'Intercalar' do ASAS (CARE, 2002).	112
Tabela 5-3: Lista de erros da HAZOP (COSPACE, 2006b).	115
Tabela 6-1: Componentes do tipo de cor $AC State$.	139
Tabela 7-1: Critérios de filtragem aplicados no IPS.	167
Tabela A-1: Altitudes instruídas para as aeronaves durante a aproximação.	226
Tabela A-2: Velocidades instruídas para as aeronaves durante a aproximação.	227

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2-D, 3-D, 4-D Duas Dimensões, Três Dimensões, Quatro Dimensões

AC, A/C	<i>Aircraft</i>
ACAS	<i>Airborne Collision Avoidance System</i>
ACC	<i>Area Control Center</i>
ADS	<i>Automatic Dependent Surveillance</i>
ADS-B	<i>ADS Broadcast</i>
AFDS	<i>Autopilot Flight Director System</i>
AOC	<i>Airline Operations Center</i>
APP	<i>APProach control</i>
ARTCC	<i>Air Route Traffic Control Center</i>
ASAS	<i>Airborne Separation Assistance System</i>
AS	<i>Airborne Spacing</i>
ASIM	<i>Airspace SIMulations</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATCo	<i>Air Traffic Controller</i>
ATCS	<i>Air Traffic Control System</i>
ATCSCC	<i>Air Traffic Control System Command Center</i>
ATFM	<i>Air Traffic Flow Management</i>
ATIS	<i>Air Traffic Information System</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATMS	<i>Air Traffic Management System</i>
ATS	<i>Air Traffic Service</i>
ATSH	<i>Automated Trajectory Server Host</i>
CAP	<i>Collaborative Arrival Planning</i>
CATS	<i>Continental Air Traffic Simulator</i>
CDM	<i>Collaborative Decision Making</i>
CDTI	<i>Cockpit Display of Traffic Information</i>
CDU	<i>Control and Display Unit</i>
CNS/ATM	<i>Communication, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management</i>
CTAS	<i>Center-Tracon Automation System</i>
CTD	<i>Constant Time Delay</i>
DD	<i>Densidade Dinâmica</i>
EAM	<i>European Airspace Model</i>

EDA	<i>En Route Descent Advisor</i>
EDP	<i>Expedite Departure Path</i>
ENAV	<i>Società (antigo Ente) Nazionale per l'Assistenza al Volo (Itália)</i>
ESF	<i>Energy Share Factor</i>
ETA	<i>Estimated Time of Arrival</i>
E-TMA	<i>Extended Terminal Movement Area</i>
EUA	Estados Unidos da América
EUROCAE	<i>European Organization for Civil Aviation Equipment</i>
Eurocontrol	Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FAF	<i>Final Approach Fix</i>
FAST	<i>Final Approach Spacing Tool</i>
FIR	<i>Flight Information Region</i>
FL	<i>Flight Level</i>
FMS	<i>Flight Management System</i>
GNC	<i>Guidance, Navigation and Communication</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization, também denominada OACI</i>
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>
IPN	<i>Interaction Petri Net</i>
IPS	<i>Interacting Particles System</i>
IRS	<i>Inertial Reference System</i>
LDRR	<i>Limited Dynamic Re-Routing</i>
LPN	<i>Local Petri Net</i>
MCP	<i>Mode Control Panel</i>
McTMA	<i>Multiple-Center Traffic Management Advisor</i>
MTCD	<i>Medium-Term Conflict Detection</i>
NAS	<i>National Airspace System (EUA)</i>
NASPAC	<i>National Airspace System Performance Analysis Capability</i>
NATS	<i>National Air Traffic Services (Reino Unido)</i>
NLR	<i>National Aerospace Laboratory, nos Países Baixos.</i>
NM	<i>Nautical Mile</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration (EUA)</i>
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional, também denominada ICAO
OHA	<i>Operational Hazard Assessment</i>

OPGEN	<i>OPtimal trajectory GENerator</i>
PF	<i>Pilot Flying</i>
PMAC	<i>Performance Monitoring and Analysis Capability</i>
PNF	<i>Pilot Not Flying</i>
RA	<i>Resolution Advisory</i>
RAMS	<i>Reorganized ATC Mathematical Simulator</i>
RNAV	<i>aRea NAVigation</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>
RTCA	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics</i>
RT, R/T	<i>Radio Telecommunication</i>
RUC	<i>Rapid Update Cycle</i>
RVSM	<i>Reduced Vertical Separation Minima</i>
SDCPN	<i>Stochastically and Dynamically Coloured Petri Net</i>
SIMMOD	<i>SIMulation MODel</i>
STA	<i>Scheduled Time of Arrival</i>
TA	<i>Traffic Advisory</i>
TAAM	<i>Total Airspace and Airport Modeller</i>
TAS	<i>True Air Speed</i>
TBS	<i>Time-Based Spacing</i>
TCAS	<i>Traffic Collision Avoidance System</i>
TECS	<i>Total Energy Control System</i>
TLS	<i>Target Level of Safety</i>
TMA	<i>Terminal Movement Area</i>
TMA-SC	<i>Traffic Management Advisor – Single Center</i>
TMC	<i>Traffic Management Coordinator</i>
TOPAZ	<i>Traffic Organization and Perturbation AnalyZer</i>
TPG	<i>The Preston Group</i>
TRACON	<i>Terminal Radar Approach CONtrol</i>
UPR	<i>User Preferred Routing</i>
URET	<i>User Request Evaluation Tool</i>
WPT	<i>Way Point</i>
ZFW	<i>Ft. Worth ARTCC</i>

1 Introdução

O intuito deste capítulo é apresentar os objetivos desta Tese de Doutorado, a motivação que a originou e as justificativas da escolha do tema de pesquisa.

Atualmente, apesar da existência de novas tecnologias de instrumentação e comunicação com aeronaves, como navegação por satélite e ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*), faz-se pouco uso do seu potencial para aumentar a capacidade e a eficiência do sistema de tráfego aéreo, porque a estrutura organizativa deste sistema evoluiu muito pouco desde o estabelecimento do uso do radar, na década de 60, e ainda hoje o uso de automação ainda é pouco intenso na maioria dos espaços aéreos do mundo. A capacidade do sistema de tráfego aéreo mede-se por meio da quantidade de movimentos simultâneos de aeronaves que ele suporta, medida por recurso (por pista, por setor de espaço aéreo, etc.), ou por algum conjunto de recursos (um agrupamento de setores, ou uma região terminal contendo diversos aeroportos / pistas, etc.).

O aumento esperado na demanda por vôos para os próximos anos é significativo, de acordo com dados de algumas instituições representativas da área. A FAA (*Federal Aviation Administration*, EUA) trabalha com uma previsão de crescimento médio de 2% ao ano, referente à carga de trabalho nos seus órgãos de controle (FAA, 2004). Já para o transporte aéreo total com origem e/ou destino nos EUA, expresso em número de vôos, a FAA prevê um crescimento médio de 4,7% (FAA, 2004). Por outro lado, a OACI (Organização da Aviação Civil Internacional) (ICAO, 2004) prevê um crescimento mundial médio de 4,4% no número de passageiros-quilômetro transportado, e de 6,2% no número de toneladas-quilômetro transportadas, até o ano de 2015, conforme ilustram as figuras 1-1 e 1-2*.

A carga de controle de tráfego aéreo, caso sejam mantidos os procedimentos e equipamentos atuais, terá um crescimento parametrizado pelo número de movimentos de aeronaves, medidos em decolagens ou pousos, e pela quantidade de aeronaves-quilômetro percorridos.

* Figuras baseadas em (ICAO, 2004) e atualizadas com dados de (ICAO, 2006).

Fig. 1-1: Tendência mundial de aumento do tráfego regular de passageiros (ICAO, 2004; ICAO, 2006).

Fig. 1-2: Tendência mundial de aumento do tráfego regular de carga (ICAO, 2004; ICAO, 2006).

Segundo a OACI (ICAO, 2004), o número médio previsto de aeronaves-quilômetro executados crescerá a uma média de 4,2% ao ano, e o número de decolagens crescerá a uma

média de 3,2% ao ano, até 2015. Isto significa um aumento, no período compreendido entre 2006 e 2015, de 44,8% no número de aeronaves-quilômetro, e 32,78% no número de decolagens. Além destes fatores, a OACI também leva em consideração as seguintes estimativas:

- Um aumento no índice de aproveitamento das aeronaves (porcentagem média de assentos ocupados por voo) de 71% para 73%;
- Não haverá variação significativa do número médio de assentos por aeronave, apesar de variações em alguns setores; e
- Um aumento médio da distância média percorrida por etapa, por aeronave, de 1% ao ano, ou seja, aproximadamente 11% entre 2004 e 2015.

A partir destes parâmetros, a estimativa da OACI de aumento do número de movimentos de aeronaves é de 50% entre os anos de 2002* e 2015. Desta forma, é possível observar que a capacidade de tráfego, determinada pelos principais aeroportos e espaços aéreos do mundo, terá que passar por um aumento considerável. Nestas previsões, é preciso levar em conta que o Brasil possui um potencial de crescimento em transporte aéreo bastante significativo, dado que uma parcela muito grande da população brasileira ainda não tem acesso ao transporte aéreo.

Por outro lado, a construção da infra-estrutura física aeroportuária não acompanha o aumento da demanda. Com frequência, fatores econômicos, políticos e ambientais tornam inviável a criação ou a expansão de aeroportos. Dessa forma, é necessário maximizar a utilização dos recursos existentes. Entretanto, o puro aumento do tráfego, sem alterações de procedimentos e tecnologia, próximo ou além do limite da capacidade atualmente existente, pode gerar atrasos e incidentes com maior frequência. Por isso, um aproveitamento ótimo da capacidade aeroportuária precisa ser obtido com a utilização de novos procedimentos. Um destes procedimentos é o Espaçamento Aerotransportado, que será estudado detalhadamente neste trabalho.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho de pesquisa é investigar o risco da introdução de um novo procedimento de gerenciamento de tráfego aéreo em Áreas Terminais de alta densidade de

* Não foi possível encontrar estimativas mais recentes do que os dados de 2002, envolvendo todos os fatores considerados.

tráfego. Este procedimento consiste em dividir, entre o controlador de tráfego aéreo (ATCo – *Air Traffic Controller*) e os pilotos, a tarefa de espaçar as aeronaves que chegam em sequência a um mesmo aeroporto. Atualmente, o trabalho de espaçamento é realizado pelo ATCo, e o piloto apenas aplica os ajustes de velocidade e direção solicitados pelo controlador. No novo procedimento, as aeronaves que estiverem com equipamento adequado possibilitarão ao piloto conhecer, sem auxílio do ATCo, quais serão os ajustes de velocidade necessários para alcançar e manter o espaçamento requisitado. Ademais, os projetos para este novo procedimento possibilitam que a velocidade da aeronave seja ajustada automaticamente pelo equipamento, sem intervenção do piloto. Este novo procedimento é denominado aerotransportado por dois motivos: o primeiro é que, uma vez iniciado, o ciclo de comunicação entre as aeronaves envolvidas se dá por dispositivos eletrônicos presentes exclusivamente nas aeronaves; e o segundo é que a literatura disponível na língua inglesa utiliza o termo *airborne*, que não tem tradução exata para português e, sendo assim, o termo que melhor se adapta é “aerotransportado”, sendo empregado neste trabalho.

É esperado que a utilização deste e de outros procedimentos possibilitados por ferramentas de automação proporcione um aumento da capacidade de tráfego nas áreas terminais. A capacidade de tráfego é limitada por dois tipos de fatores, de acordo com a fase do voo. O fator dominante, quando a aeronave está no espaço aéreo, é a complexidade do estado do setor gerenciado pelo ATCo, que trabalha em um posto de trabalho dedicado à sua tarefa. Esta complexidade é fortemente influenciada pelo número de aeronaves dentro dos limites do setor. Por outro lado, quando a aeronave vai pousar ou decolar, o fator dominante é o conjunto de distâncias e tempos mínimos de espaçamento entre aeronaves pousando ou decolando, ainda que outros recursos do aeroporto também tenham influência na capacidade, como número de pontos de estacionamento, pistas de táxi, etc. As ferramentas de automação de chegadas podem permitir um aumento significativo na complexidade aceita para um setor de espaço aéreo e também um aproveitamento ótimo das pistas, diminuindo ao máximo o seu tempo ocioso em sequências de pousos e decolagens. Isto tem como consequência direta um aumento no número de pousos e decolagens por unidade de tempo, o que pode ser obtido desde que os níveis de segurança sejam aumentados, para que não aumente o número de acidentes ocorridos.

1.2 Justificativa

Para que o transporte aéreo tenha eficiência operacional, ou seja, para que o tempo de voo e o gasto de combustível sejam minimizados, é preciso que exista agilidade na tomada de decisão, principalmente quando seus recursos, como pistas, espaço aéreo e posições de controle, estão próximos de seus limites de capacidade. Por outro lado, o conceito de capacidade tem aspectos subjetivos e, definitivamente, o que estabelece seus limites é o nível de risco das operações realizadas.

Para exemplificar, o limite de capacidade de uma pista é o número máximo de movimentos (pousos e/ou decolagens) que esta admite por certa unidade de tempo, sem que o risco de colisão ultrapasse um limite máximo aceitável. Outro exemplo é a capacidade das posições (postos) de controle, que são operadas por um ou dois controladores humanos, que admitem um número máximo de aeronaves para serem controladas simultaneamente, sem que os controladores entrem em um estado de estresse excessivo.

No entanto, os limites de capacidade são, até certo ponto, flexíveis, desde que se utilize a tecnologia adequada, suportada por sistemas seguros de automação. Mesmo assim, conforme o tráfego cresce, suas operações são cada vez mais frequentemente realizadas em estado de saturação da capacidade dos recursos físicos e dos sistemas de gerenciamento. Neste estado, a eficiência global do sistema tende a diminuir, principalmente por causa da ocorrência de alguns fatores (AATT, 1997):

- Cancelamento de vôos;
- Esperas feitas pelas aeronaves (em solo ou no ar);
- Impossibilidade de uma aeronave obter autorização para a rota desejada;
- Impossibilidade de uma aeronave obter autorização para a altitude desejada; e
- Impossibilidade de uma aeronave obter autorização para a velocidade desejada.

Estes itens são consequências típicas das restrições de capacidade de aeroportos ou de espaço aéreo, ou ainda de mudanças de tempo, e causam um custo considerável para os participantes do sistema (empresas aéreas, passageiros, governo, etc.). O planejamento de tráfego e a previsão de tempo agem para minimizar estas ocorrências, mas a presença de distúrbios imprevistos faz com que parte significativa do planejamento seja desperdiçada. Quando os recursos estão saturados, as possibilidades de compensar atrasos e desvios de trajetória

diminuem e, conseqüentemente, o tempo de voo e o gasto de combustível aumentam sistematicamente, deteriorando a eficiência do sistema.

Além do aumento da capacidade, decisões sobre mudanças nos horários de vôos podem ser feitas de forma a diminuir gastos operacionais no sistema. Pequenas mudanças de horário e trocas de posição no sequenciamento de aeronaves podem diminuir significativamente o tempo de voo para determinadas aeronaves, sem prejudicar os demais participantes do sistema de tráfego. O projeto de sistemas mais eficientes de gerenciamento de tráfego aéreo precisa ser feito com o conhecimento do impacto que este novo sistema causará na segurança dos vôos. Dada esta necessidade, o presente trabalho tem enfoque na análise de segurança do gerenciamento das operações de chegada de aeronaves em aeroportos, utilizando alguns novos procedimentos que estão sujeitos a diversos perigos e parâmetros incertos. Os parâmetros incertos estão relacionados a fatores como imprecisão no conhecimento das posições presente e futura da aeronave, efeitos de turbulência, entre outros, e os perigos são principalmente aqueles relacionados com a colisão entre aeronaves. As incertezas e os perigos necessitam ser modelados matematicamente para a obtenção de resultados quantitativos sobre o nível de segurança oferecido.

1.3 Organização do Trabalho

Esta tese apresenta, no Capítulo 2, uma visão geral sobre o estado da arte em sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo, começando por uma introdução conceitual, e então dando enfoque aos sistemas de inteligência e suporte à decisão. No Capítulo 3, são apresentados modelos para estudo e análise do tráfego aéreo, levando em consideração os riscos envolvidos neste sistema; tais modelos vão desde o controle individual da aeronave, até o comportamento do sistema de tráfego como um todo. No Capítulo 4, são apresentadas análises sobre o impacto da tecnologia nos sistemas de ATM, tendo em vista a eficiência operacional e os níveis de segurança proporcionados com a presença das diversas tecnologias. Já no Capítulo 5, é apresentado o modelo conceitual de ATM que foi assumido nesta tese, incluindo as tarefas atribuídas aos operadores humanos, a descrição de procedimentos de separação aerotransportada, e alguns requisitos técnicos para realização deste tipo de operação. Na seqüência, o Capítulo 6 apresenta o modelo formal que descreve matematicamente a operação de Espaçamento Aerotransportado no espaço aéreo próximo aos aeroportos. Este modelo formal serviu como base para o cálculo da probabilidade de colisão entre aeronaves, apresentado no Capítulo 7, fazendo uso de uma versão acelerada do método Monte Carlo.

Obtidas as probabilidades de colisão, o Capítulo 8 apresenta uma investigação das possíveis cadeias de eventos que estão associadas às colisões nos cenários simulados. Por fim, o Capítulo 9 apresenta as conclusões gerais desta tese, e as sugestões de futuros trabalhos correlacionados com o conteúdo deste trabalho.

Fazem parte também do conteúdo deste trabalho os Apêndices A, B e C na forma eletrônica (CD).

2 Estado da Arte em Sistemas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo

Este capítulo apresenta um estudo das características dos sistemas existentes de gerenciamento de tráfego aéreo, com o enfoque nos benefícios oferecidos pelas ferramentas de apoio de última geração, estejam elas já em uso ou em fase de desenvolvimento.

2.1 Introdução aos Sistemas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo

O tráfego aéreo decorre da atividade de operadores de aeronaves, que podem ser civis ou militares, e que podem oferecer serviços de transporte de passageiros e de carga. Considerando que a maior parte do tráfego aéreo é gerada por transportadores civis, são considerados neste trabalho somente os operadores civis. Um operador deste tipo será denominado doravante de Transportador, simplesmente. Não são consideradas neste trabalho peculiaridades da aviação militar.

Um Transportador utiliza-se de recursos públicos^{*}, como aeroportos e espaço aéreo. Cada nação permite o uso destes recursos conforme seus interesses econômicos e políticos e, para que isto seja feito, possui uma Autoridade Aeronáutica que é responsável por regulamentar e administrar a atividade conjunta dos vários Transportadores. Dessa forma, a administração do transporte aéreo ocorre em duas frentes, uma que é a frente da Autoridade Aeronáutica, e outra que é a frente do Transportador.

2.1.1 Frente Administrativa do Transportador Aéreo

A frente administrativa do Transportador Aéreo é desempenhada por duas entidades, em níveis diferentes. Em um nível está o Centro Operacional da Companhia Aérea (AOC – *Airline Operations Center*), que programa as escalas de aeronaves e tripulações, e também supervisiona o embarque e desembarque de passageiros.

No outro nível administrativo está a tripulação na aeronave, que precisa tomar decisões de controle de trajetória, para que o voo seja executado de acordo com os interesses da companhia e os comandos da Autoridade Aeronáutica.

^{*} Os aeroportos de grande porte podem ser públicos ou privados, mas seus recursos são, via de regra, publicamente disponíveis, ainda que seu uso seja pago.

2.1.2 Frente Administrativa da Autoridade Aeronáutica

A frente administrativa da Autoridade Aeronáutica é responsável por fazer com que as programações de vôos de diversos Transportadores Aéreos sejam compostas e executadas em uma única grande operação, dentro dos limites do espaço aéreo sob sua jurisdição. Esta tarefa é feita com o auxílio de sistemas computacionais que coletam e processam dados sobre os estados atuais das aeronaves (por exemplo, posição, velocidade, etc.) e seus planos de vôo, exibem informações aos agentes de controle de tráfego aéreo e, no caso dos sistemas de automação, emitem ações de controle que devem ser executadas pelas Aeronaves.

As tarefas da Autoridade Aeronáutica, no que se refere à aviação civil, envolvem a fiscalização de segurança das aeronaves e de adequação às leis ambientais, o controle do espaço aéreo e a utilização dos aeroportos. Estas duas últimas tarefas são mutuamente dependentes e precisam estar interconectadas em um único sistema de gerenciamento.

2.1.3 Estratégia e Tática em Gerenciamento de Tráfego Aéreo

Geralmente, o Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM – *Air Traffic Management*) é entendido como a combinação de tarefas de planejamento estratégico com tarefas táticas (ELEFANTE, GOODCHILD, VILAPLANA, 2001). O planejamento estratégico é designado a uma entidade responsável pela Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM – *Air Traffic Flow Management*), que tem a tarefa de distribuir espacial e temporalmente os vôos requisitados pelos Transportadores. Esta tarefa é desempenhada em uma janela de tempo variando entre alguns meses, dias ou horas antes da execução dos vôos, e deve resultar em uma densidade de ocupação do espaço aéreo que seja gerenciável com segurança, com partidas e rotas não conflitantes, e também em uma taxa segura de movimentos em pistas de aeroporto.

O outro tipo de tarefa de ATM, composto pelas tarefas táticas, é comumente conhecido como Controle de Tráfego Aéreo (ATC – *Air Traffic Control*), e é desempenhado em um período compreendido entre algumas horas antes e o instante imediato de uma ação de vôo, estendendo-se ao longo deste, até que se complete o pouso da aeronave no aeroporto de destino. As tarefas de ATC são executadas com vistas ao ajuste do planejamento estratégico, com base em informações mais atualizadas. Elas estão delimitadas em períodos mais curtos de tempo e, por isso, são alvo desejado de maior automação. Por causa de sua criticidade, tais tarefas exigem controle de execução em tempo real. Somando isso ao fato de estas aplicações exigirem dados de entrada provenientes de diversos dispositivos de medição, entre eles radar

e altímetros, o resultado é que o Sistema de Controle de Tráfego Aéreo (ATCS – *Air Traffic Control System*) exige, normalmente, ferramentas computacionais de alto desempenho e alta confiabilidade.

2.1.4 Visão Geral do Sistema de Controle de Tráfego Aéreo

A estrutura do Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATMS – *Air Traffic Management System*) é dada pelo ATCS que, por sua vez, está estruturado de acordo com uma divisão geográfica definida pela Autoridade Aeronáutica, considerando os aspectos de complexidade de gerenciamento, tecnologia disponível e soberania nacional, dentre outros.

Normalmente, a Autoridade Aeronáutica divide seu espaço aéreo em Regiões de Informação de Voo (FIR – *Flight Information Region*). Cada FIR é responsável por gerenciar o tráfego de aeronaves em todo espaço aéreo sob sua jurisdição. Tomando como exemplo o Brasil, as regiões de espaço aéreo associadas a cada FIR estão ilustradas na Fig. 2-1. Cada FIR é dividida em Setores, os quais estão indicados pelas linhas mais claras da Fig. 2-1. Qualquer voo que passe nestas regiões de espaço aéreo estará dentro do ATCS brasileiro e deverá proceder de acordo com as regras deste sistema que, por sua vez, opera de acordo com os padrões estabelecidos pela OACI (Organização da Aviação Civil Internacional).

Desta forma, foram apresentadas até então quatro tipos de entidade relacionadas ao ATCS: O ATCS propriamente dito, a FIR, o Setor de FIR e a Aeronave. O ATCS tem autoridade direta sobre as FIRs que coordena. Cada FIR, por sua vez, é composta por diversos setores sob uma mesma coordenação. Por outro lado, para entender como se dá a inserção da aeronave nesta organização, é preciso entender todo o procedimento de voo IFR (*Instrument Flight Rules*).

Um voo se inicia em um aeródromo. Serão considerados neste trabalho somente os aeródromos preparados para suportar operações da aviação comercial pública, os quais são denominados aeroportos. Um aeroporto é uma entidade que tem uma complexidade própria e exige pelo menos um órgão de controle dedicado. Este órgão precisa controlar a aproximação, o pouso e a decolagem de aeronaves, bem como a movimentação de veículos em solo do aeroporto.

Fig. 2-1: Divisão geográfica do ATCS brasileiro em FIRs e seus setores (NCAG 2, 2004).

Para decolar, uma aeronave precisa solicitar e receber uma autorização do controle do aeroporto, devido à utilização de sua pista, e também para que seja feita a coordenação do voo com o controle da FIR para onde se direciona o voo. Desta forma, o primeiro contato entre uma aeronave e o ATCS é o aeroporto.

Em boa parte dos aeroportos do país, o gerenciamento da aeronave depende diretamente do órgão de controle da FIR. No entanto, quando a demanda para pousos e decolagens em um determinado aeroporto causa uma densidade maior de ocupação do espaço aéreo ao seu redor, impondo uma carga de trabalho acima do desejável aos controladores de tráfego aéreo, é estabelecido um órgão de controle à parte, denominado Controle de Aproximação, ou simplesmente APP (*APProach control*).

Neste caso, a tarefa de gerenciamento de tráfego do aeroporto é então expandida para um espaço aéreo de algumas dezenas de milhas náuticas (NM) em torno do aeroporto e dividida entre o APP e o aeroporto propriamente dito. Ademais, pode haver diversos aeroportos dependendo de um mesmo APP, conforme ilustra a Fig. 2-2. Nesta ilustração, que representa simplificada a Área Terminal de São Paulo, as pistas dos aeroportos estão representadas pelos pequenos segmentos de reta dentro dos setores. Os aeroportos são: SBGR - Aeroporto de Guarulhos; SBKP - Aeroporto de Viracopos, Campinas; e SBSP - Aeroporto de Congonhas, São Paulo. Uma Área Terminal de Tráfego Aéreo é comumente designada por TMA (*Terminal Movement Area*, ou também *Terminal Maneuvering Area*), e está sob o controle de um órgão do tipo APP.

Fig. 2-2: TMA São Paulo, dividida em setores internos (NCAG 2, 2004).

Prosseguindo com o voo, assim que a aeronave decola, ela passa a estar sobre controle do APP da TMA onde se encontra. Mais especificamente, o APP divide o seu trabalho dentro da TMA em Setores (vide Fig. 2-2), e a aeronave está sob controle de um ou dois operadores específicos para o setor onde se encontra.

A partir do momento em que ela está prestes a ultrapassar a fronteira da TMA, seu controle é transferido a um órgão denominado ACC (*Area Control Center*), que é a entidade que exerce o controle de tráfego dentro de uma FIR. Este ACC possui um ou dois operadores específicos para cada um dos setores da FIR (vide Fig. 2-1) onde a aeronave possa estar. A aeronave vai sendo transferida de setor para setor e de ACC para ACC, sucessivamente, até atingir uma distância próxima ao aeroporto de destino. Para cada setor do espaço aéreo, podem estar trabalhando nele um controlador tático, que se comunica com as aeronaves, e um controlador planejador, que cuida das providências necessárias para o recebimento adequado das aeronaves no setor e, por isso, trabalha com um tempo maior de antecedência do que o controlador tático.

Quando a aeronave está chegando próxima ao aeroporto de destino, ela atinge a TMA correspondente, e a troca de controle ocorre no processo inverso ao ocorrido na saída do aeroporto de origem.

Dado este padrão de procedimento de voo, os sistemas de tráfego aéreo apresentam uma organização de natureza hierárquica, que pode ser representada por meio do diagrama da Fig. 2-3. Nesta figura, as setas representam troca de informações, e as linhas conectoras simples são relações de dependência direta (que implicam também em troca de informações).

Fig. 2-3: Organização do Sistema de Controle de Tráfego Aéreo (ATCS).

Observam-se ainda na Fig. 2-3 as estações meteorológicas, cujos dados fornecidos são entradas importantíssimas para a tarefa de ATC.

2.1.5 Visão Geral do Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo

Uma vez apresentada a estrutura do ATCS, é possível elaborar um modelo abstrato para o ATMS. É importante observar que ambos são compostos tanto pela frente administrativa do Transportador, como pela frente administrativa da Autoridade Aeronáutica. No entanto, a Autoridade Aeronáutica tem a responsabilidade de oferecer serviços que permitam ao Transportador agir de acordo com as regras de gerenciamento do sistema de tráfego aéreo.

Fazendo a abstração de considerar o ATCS como um sistema à parte do ATMS, guardando a interdependência de ambos, o modelo de ATMS pode ser representado de acordo com a Fig. 2-4.

Fig. 2-4: Modelo do ATMS.

Na Fig. 2-4, as setas (cheias e tracejadas) representam canais de comunicação utilizados para a interação entre as diversas entidades. Os canais entre as aeronaves e o ATCS são estabelecidos conforme explicação anterior sobre o ATCS; os canais entre as aeronaves e os respectivos AOCs transportam informações digitais e são operados por prestadores de serviços especializados, por meio de frequências de rádio e canais de satélite; e o canal entre ATFM e ATCS funciona da seguinte forma: o ATFM fornece uma programação de vôos ao ATCS, que então passa a zelar por sua execução, de forma segura e pontual. À medida que os planos de vôos são executados, perturbações internas e externas ao tráfego aéreo podem forçar que a execução dos vôos ocorra de maneira diferente do que inicialmente planejado. Para evitar que tais situações acarretem momentos de tráfego com densidade muito alta ou mesmo caótico em determinados setores do espaço aéreo, o ATFM também tem a função de monitorar o estado atual do ATCS, estimar o estado futuro do sistema e, caso seja necessário, modificar as programações de vôos para atender a demanda de vôos em situações de contingência. As linhas de comunicação entre o ATMS e o ATFM, e entre o ATMS e o ATCS, são utilizadas para o processo de decisão em situações como esta.

O módulo ATMS representado na Fig. 2-4 é essencialmente uma entidade de tomada de decisões que envolvam interesses de ATFM e ATCS juntos, principalmente nas situações onde tais interesses estejam ou aparentem estar em conflito.

Os canais de comunicação entre as aeronaves e os respectivos AOCs são utilizados principalmente como uma forma de monitoração da execução de cada voo. Os AOCs utilizam-se das informações atualizadas para otimizar todas as operações de solo referentes à utilização das aeronaves, incluindo o gerenciamento de tripulações e o atendimento aos passageiros em embarque e desembarque. Tais canais funcionam usualmente utilizando serviços de comunicação móvel fornecidos por empresas especializadas.

Os canais de interação entre os AOCs e o ATFM servem para que os AOCs façam as requisições de voos. O ATFM tentará inserir os voos requisitados na programação geral da melhor forma possível, mas os voos requisitados podem ser inseridos na programação com algumas alterações de horários e/ou de rotas devido a conflitos ou concentração excessiva de movimento.

Por fim, os canais tracejados da Fig. 2-4 estão ou estarão presentes somente nos sistemas de última geração (CDM, 2004), nos quais os AOCs podem negociar diretamente com o ATCS modificações não planejadas em rotas e horários, durante o voo ou poucos minutos antes, para responder a situações momentâneas de maneira mais eficiente para os interesses da companhia, sem prejudicar a ação das outras entidades do sistema. Esta forma de colaboração pode aumentar consideravelmente a qualidade e a eficiência do transporte aéreo.

2.2 Sistemas de Automação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo

Nesta seção, são apresentados sistemas de automação do Gerenciamento do Tráfego Aéreo, desenvolvidos e utilizados nos Estados Unidos da América (EUA) e na Europa. Tais sistemas procuram otimizar a capacidade de trabalho dos controladores de tráfego aéreo, e assim proporcionar uma melhor qualidade de serviço aos pilotos e companhias aéreas.

2.2.1 Sistema de Automação de Tráfego Aéreo dos Estados Unidos da América - CTAS

O CTAS (*Center-TRACON Automation System*) é a ferramenta desenvolvida para controlar a maior parte do tráfego aéreo dos EUA. O CTAS segue a divisão regional do espaço aéreo ilustrada na Fig. 2-5.

De acordo com a Fig. 2-5, os Centros de Controle de Área, denominados ARTCC (*Air Route Traffic Control Center*), são similares ao que se denominam ACC nas outras regiões do planeta. Também são denominados simplesmente de Centro, existindo 20 deles nos EUA. Os

Controles de Área Terminal, denominados TRACON (*Terminal Radar Approach CONTROL*), são similares ao que em outras regiões do mundo são mais conhecidos como APP, totalizando ao redor de 400 entidades nos EUA. O Centro controla amplas regiões do espaço aéreo e, por sua vez, pode conter diversos TRACONs. O Centro presta serviços a aeronaves que estão no espaço aéreo superior (acima de 24.500 pés* de altitude), além de coordenar procedimentos com órgãos de controle envolvidos em vôos que passem pelas suas fronteiras. Já o TRACON é responsável por gerenciar saídas e chegadas de aeroportos que estejam dentro de uma região mais limitada do espaço aéreo, normalmente algumas dezenas de milhas náuticas ao redor de um aeroporto principal. Além das entidades ilustradas, também existem os órgãos de controle de aeroporto, mais conhecidos como Torre.

Fig. 2-5: Divisão do espaço aéreo dos EUA (CTAS, 2003).

Apesar de todas as similaridades, a diferença entre o sistema de controle de tráfego dos EUA e o da maioria das outras regiões do mundo é o alto grau de integração e de homogeneidade entre os diversos órgãos de controle, vigente para um amplo espaço aéreo. Esta integração é obtida pelo fato de os serviços de navegação aérea serem administrados de forma centralizada pela FAA. O CTAS surge como a principal ferramenta de caráter operacional para auxiliar nesta administração.

O CTAS provê, entre outros benefícios, ferramentas de automação para o planejamento e controle de tráfego de chegada em aeroportos. Ele gera recomendações para aumentar a eficiência no consumo de combustível e para reduzir atrasos, além de prover assistência de

* 1 pé equivale a 12 polegadas ou a 0,3048 metro.

automação para controladores de tráfego, para que eles obtenham sequenciamento e separação aceitáveis entre aeronaves, bem como maior capacidade de movimento em aeroportos. Esses auxílios proporcionados pelas ferramentas de automação são fornecidos sem diminuição da segurança ou aumento da carga de trabalho do controlador (CTAS, 2003).

2.2.1.1 Ferramentas do CTAS

As principais ferramentas do CTAS são apresentadas a seguir, de acordo com a referência (CTAS, 2003):

- TMA – *Traffic Management Advisor*: auxilia na criação de planos e na otimização do fluxo de tráfego. Os planos são criados por um agente denominado TMC – *Traffic Management Coordinator*. Existem dois tipos de TMA: TMA-SC (TMA-*Single Center*) e McTMA (*Multiple-center TMA*), explicados na seção 2.2.1.3;
- EDA – *En route Descent Advisor*: presta assistência aos controladores de cada setor possibilitando a detecção e resolução de conflitos entre aeronaves, provendo recomendações para a execução dos planos elaborados pelo TMC;
- FAST – *Final Approach Spacing Tool*: auxilia os controladores a designar pistas para as aeronaves e também a seqüenciar e escalonar aeronaves na aproximação final para a pista;
- UPR – *User Preferred Routing*: auxilia na redefinição dinâmica de rotas, verificando a possibilidade de conflito dentro de uma janela de tempo de até 20 minutos, em diversas configurações de posicionamento das aeronaves. As ferramentas de UPR do CTAS combinam predição determinística de trajetória com análise estocástica de conflito. Algumas versões mais recentes implantadas com o projeto originado nesta ferramenta-conceito têm sido denominadas por URET (*User Request Evaluation Tool*) (FAA – FFP1, 2002);
- *Direct-To*: identifica aeronaves que podem economizar ao menos um minuto se voarem direto para um fixo (ponto de rota previamente fixado) subsequente em seu plano de vôo, sem passarem por outros fixos intermediários, exibindo-as em uma lista para o controlador. Para cada uma das aeronaves identificadas, a ferramenta pode exibir o novo plano de vôo e indicar a quantia de tempo a ser economizado, permitindo que o controlador altere e/ou aceite o novo plano (vide Fig. 2-6). Esta

ferramenta trabalha em conjunto com o UPR para que o novo plano de voo esteja livre de conflito;

- EDP – *Expedite Departure Path*: é uma ferramenta, ainda em fase de definição conceitual, que fará uso do planejamento de trajetórias baseado no desempenho das aeronaves, que é uma das funções do CTAS, para prover recomendações que ajudem os controladores de tráfego aéreo a gerenciar a demanda de saída de aeroportos e o sequenciamento de aeronaves, espaçando-as e inserindo-as nos fluxos de rota;
- CAP – *Collaborative Arrival Planning*: também em fase de definição conceitual, esta ferramenta fornecerá horários estimados e horários requeridos de chegadas de vôos para que as companhias tenham previsões consistentes de horários de chegada e possam melhorar a eficiência global de seus vôos. Ainda permitirá às companhias que influenciem no estabelecimento da ordem de chegada das aeronaves, de forma que possam compensar atrasos de aeronaves específicas.

Fig. 2-6: Interface da ferramenta *Direct-To* (CTAS, 2003).

2.2.1.2 Arquitetura do CTAS

A descrição do CTAS que segue refere-se à versão de desenvolvimento conceitual, implementada no Centro de Pesquisa Ames da NASA (CTAS, 2003). A versão operacional do CTAS, que está implantada em diversos pontos do *National Airspace System* (NAS) dos EUA, pode possuir algumas diferenças em relação à descrição aqui apresentada. No entanto, por falta de documentação a respeito da versão implantada, julgou-se adequado para esta tese apresentar o CTAS com base na versão de desenvolvimento de conceito.

O CTAS é composto de diversos processos executáveis que se comunicam por meio de mensagens. A execução dos processos é distribuída entre várias estações de trabalho, interconectadas através de uma rede de alta velocidade. O contexto operacional do CTAS é apresentado na Fig. 2-7.

Fig. 2-7: Contexto de funcionamento do CTAS (CTAS, 2003).

A base de dados do CTAS, atualizada a cada 56 dias, é representada na Fig. 2-7 pelo bloco “Configuração Regional e Nacional”, e depende da descrição do espaço aéreo provida por um servidor da FAA, conhecido como Aces, e de outras fontes nacionais de descrição do espaço aéreo. Estes dados especificam fixos, aerovias, limites de setores, localizações de pistas e aeroportos, tipos de aeronaves e outros parâmetros específicos de cada região. Normalmente, a divisão regional destas fontes de dados é feita pelo ARTCC.

Por outro lado, as informações meteorológicas das quais o CTAS se alimenta devem ser atualizadas com maior frequência, para que as trajetórias possam ser previstas com maior exatidão. Atualmente, esses dados são providos pela agência *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), na forma de uma grade tridimensional de vento, temperatura e pressão, baseada em previsões de 1, 2 ou 3 horas geradas pelo sistema denominado *Rapid-Update Cycle* (RUC).

O CTAS também requer planos de vôo e dados de rastreamento (trilhas) em tempo real. Para as ferramentas TMA-SC e *Direct-To*, a fonte destes dados é o Servidor ARTCC. Para a ferramenta FAST, a fonte é tanto o Servidor TRACON como o Servidor ARTCC. No ciclo de simulação, onde participam pilotos e controladores, o CTAS também recebe dados diretamente das aeronaves simuladas.

2.2.1.3 TMA-SC e McTMA

Pelo fato de esta tese ter foco no gerenciamento de chegadas, duas ferramentas do CTAS, denominadas TMA-SC e McTMA, requerem uma explicação um pouco mais detalhada. A explicação que segue está baseada em (LANDRY et al., 2003) e (CTAS, 2003).

Para o gerenciamento do espaço aéreo dos EUA, existe um agente-chave denominado TMC (*Traffic Management Coordinator*). Os TMCs, que são operadores humanos vinculados aos Centros, controlam aeronaves que têm como destino aeroportos ligados a seu Centro e também aeronaves que saem destes aeroportos. A partir dos fluxos presente e futuro de tráfego, os TMCs criam planos para entregar as aeronaves para o TRACON, de forma que estejam espaçadas com segurança. Além disso, a frequência com que as aeronaves chegam ao TRACON pode preencher completamente a capacidade do TRACON e dos aeroportos de destino, mas nunca exceder estas capacidades.

Os planos dos TMCs consistem em seqüências e tempos agendados (STA – *Scheduled Time of Arrival*) para as aeronaves atingirem os fixos de medição (Fig. 2-8). Estes fixos são pontos localizados, geralmente, na fronteira da área terminal. Por outro lado, os controladores dos Centros emitem instruções para as aeronaves sob sua jurisdição, de forma que elas cruzem os fixos de medição nos instantes especificados (STAs) pelo TMC. Próximo à fronteira do TRACON em questão, os controladores do Centro adjacente transferem as aeronaves que chegam aos controladores deste TRACON.

A ferramenta TMA-SC (*Traffic Management Advisor – Single Center*) auxilia os TMCs e os controladores de tráfego de diversas maneiras. Uma delas é aumentando a consciência situacional com a utilização de interfaces gráficas e alertas (Fig. 2-9); outra é gerando estatísticas e relatórios sobre o fluxo de tráfego. Ademais, a TMA-SC calcula os tempos estimados de chegada (ETA – *Estimated Time of Arrival*) sem atraso, para os arcos externos de medição (Fig. 2-8) dos Centros.

Fig. 2-8: Referências utilizadas pela ferramenta TMA-SC do CTAS para gerenciar chegadas em aeroportos nos EUA (CTAS, 2003).

Fig. 2-9: Alerta de pico de tráfego fornecido pelo TMA-SC. À esquerda e à direita está exibida a sequência de voos chegando ao aeroporto (CTAS, 2003).

Por sua vez, a ferramenta McTMA (*Multiple-center Traffic Management Advisor*), além de executar as funções da TMA-SC, também auxilia os TMCs a anteciparem a demanda futura, originada em múltiplos Centros, e a regular o fluxo de tráfego nas áreas terminais relacionadas.

A TMA-SC foi implantada inicialmente no Centro Ft. Worth (ZFW) e, após um período de testes operacionais, foi instalada em seis outros Centros, dentro do chamado *Free Flight Program Phase 1* (CIP 2005, 2004), programa de modernização do sistema de controle de tráfego dos EUA. Para o *Free Flight Program Phase 2*, está previsto que ele seja implantado em quatro outros órgãos de controle. Dados comparativos, extraídos dos Centros onde o TMA-SC está implantado, indicam que ele propicia um aumento de 3% a 5% na capacidade

do tráfego. Esta porcentagem, apesar de parecer pequena, significa uma fluidez muito maior em horários de pico, possibilitando uma significativa redução de atrasos. Enquanto isto, o McTMA foi implantado em caráter experimental no TRACON de Philadelphia e integrará operações dos Centros de New York, Cleveland, Boston e Washington. Não foi encontrada na literatura uma análise detalhada do impacto causado na segurança pelo TMA-SC e pelo McTMA.

2.2.2 Algumas Ferramentas Européias para Gerenciamento de Tráfego Aéreo

O gerenciamento de tráfego aéreo na Europa conta com uma grande diversidade de ferramentas de automação, utilizadas com as mais distintas finalidades. Serão apresentadas nesta seção apenas algumas dentre as mais representativas.

2.2.2.1 Maestro

O Maestro é uma ferramenta de origem francesa (SOFREÁVIA, 2004; PIDUCH, 2000), utilizada em aeroportos como Paris Charles de Gaulle, Paris Orly, Copenhagen Kastrup, Helsinki Vantaa e Sidney. Esta ferramenta auxilia a realização do seqüenciamento de chegadas de aeronaves, utilizando informações dos sistemas de processamento de dados de voo e de processamento de dados de radar. Ela ainda proporciona a atribuição de uma pista de destino para cada aeronave que chega e emite possíveis ações de controle para o controlador, de forma a se obter o resultado mais próximo da seqüência originalmente prevista de pousos. Possui também algoritmos para distribuir a absorção de atrasos entre as aeronaves envolvidas na seqüência, que pode ser feita por meio de redução de velocidade, ou por alongamento do perfil de descida antes de, como último recurso, ser feita com a utilização de órbitas de espera, que acarretam maior gasto de combustível.

2.2.2.2 MTCD

O MTCD, cuja sigla significa *Medium Term Conflict Detection*, é um sistema integrado de ferramentas de predição que calculam trajetórias de aeronaves, monitoram o progresso das aeronaves ao longo da trajetória, detectam trajetórias conflitantes e apresentam estas informações aos controladores, com uma antecedência de até 20 minutos (SKYWAY, 2004). O MTCD é projetado para monitorar aeronaves controladas pelos ACCs, que estão em fases de voo fora das áreas terminais. O sistema monitora continuamente cada aeronave, notificando os controladores caso a aeronave se desvie da trajetória autorizada, ou se houve

alguma ocorrência de conflito. Este sistema alerta o controlador das ações a serem por ele executadas e, conseqüentemente, alivia-o de uma considerável parcela da carga de trabalho, reduzindo bastante o número de intervenções desnecessárias.

Nos sistemas de controle de tráfego aéreo, existem tipicamente dois controladores para cada setor. Um deles é o controlador procedural ou planejador, que estabelece planos de ação de médio prazo para proporcionar condições propícias para o gerenciamento de tráfego aéreo no setor. O outro é o controlador executivo ou tático, que emite as ordens e autorizações para os pilotos, e controla as situações mais imediatas. Atualmente, é comum que a carga de trabalho do controlador tático seja muito maior que a do controlador planejador. Esta divisão de trabalho era mais balanceada antes da introdução do radar no controle de tráfego aéreo. Com a introdução do radar, o controlador tático acumulou tarefas como monitoração de tráfego, tomada de decisão e radiotelefonia, deixando o controlador planejador com uma tarefa puramente de coordenação estratégica. A função de planejamento, que lida com aeronaves que ainda não estabeleceram contato radiotelefônico com o controlador executivo, tornou-se secundária (VINK, 1997).

O objetivo do MTCD é facilitar a transição desta forma existente de controle de tráfego aéreo, que é bastante reativa, para um controle mais pró-ativo. Isto faz com que se balanceie a carga de trabalho tática com a carga de trabalho de planejamento, aumentando a eficiência do grupo de controladores de um setor e oferecendo um serviço mais seguro para os usuários do espaço aéreo.

O MTCD foi desenvolvido pelo NLR (*National Aerospace Laboratory*, Países Baixos), a partir da segunda metade da década de 1990, e foi implantado para testes operacionais que se realizaram entre os anos de 2002 e 2004 nos ACCs Malmö, Roma e no *Upper Area Control Center* de Maastricht. Os testes foram conduzidos por um consórcio envolvendo o NLR, o grupo francês Sofreávia, o NATS (*National Air Traffic Services*), do Reino Unido, o ENAV (*Ente/Società Nazionale per l'Assistenza al Volo*) e a empresa Deep Blue, da Itália, o Luftfartsverket (Gerenciamento de Aeroportos e Serviços de Navegação Aérea), da Suécia, e o próprio Eurocontrol (Organização Européia para a Segurança da Navegação Aérea). O resultado geral destes testes é que o MTCD foi bem recebido pelos profissionais de controle de tráfego aéreo e pode, de fato, contribuir para melhorar a segurança de tráfego aéreo na Europa, com potencial para melhorar a distribuição de tarefas entre os controladores táticos e os controladores de planejamento.

2.2.3 Sistema de Assistência de Separação Aerotransportado (ASAS)

ASAS é a sigla para designar Sistema de Assistência de Separação Aerotransportado (*Airborne Separation Assistance System*), conceito surgido nos anos 90 e definido pela OACI no documento (ICAO, 2003). Segundo este documento, ASAS significa:

“Um sistema aerotransportado que provê assistência à tripulação na realização da separação da própria aeronave das outras aeronaves”.

Ademais, o documento (ICAO, 2003) define o conceito de aplicação ASAS:

“Um conjunto de procedimentos operacionais para controladores e tripulações que faz uso de um sistema autônomo de assistência de separação para atender uma meta operacional definida”.

Existem quatro grandes categorias de aplicações ASAS que foram identificadas:

1. Consciência Situacional do Tráfego;
2. Espaçamento Aerotransportado;
3. Separação Aerotransportada; e
4. Auto-Separação Aerotransportada (em relação a todo o tráfego).

Estas quatro categorias de aplicações ASAS são descritas a seguir.

2.2.3.1 Aplicações para Consciência Situacional do Tráfego

As aplicações para consciência situacional do tráfego têm a meta de reforçar o conhecimento da tripulação de um voo da situação de tráfego nas redondezas, tanto no ar como na superfície de um aeroporto. Dessa forma, o processo de tomada de decisão da tripulação fica melhorado para o gerenciamento seguro e eficiente do voo. Não há previsão de mudanças significativas nas tarefas de separação para estas aplicações e tampouco haverá mudança na responsabilidade da separação. Entretanto, é possível que o mero fato de se conhecer mais precisamente a situação de tráfego implique em alterações nos procedimentos adotados e na fraseologia entre pilotos e controladores de tráfego e vice-versa.

2.2.3.2 Aplicações de Espaçamento Aerotransportado

Nas aplicações de Espaçamento Aerotransportado, a provisão de separação permanece sob responsabilidade do ATCo. Este requisita à tripulação do voo a realização de novas tarefas

com a finalidade de atingir ou manter uma dada distância ou tempo da aeronave designada, conforme especificado num novo tipo de instrução de tráfego.

Os ATCos podem usar instruções de Espaçamento Aerotransportado para acelerar e manter o fluxo ordenado de tráfego, ou para prover separação. A habilidade do controlador para enviar instruções para a tripulação, referentes à aplicação de um espaçamento especificado da aeronave designada, alimenta a expectativa de aumentar a produtividade do trabalho do controlador, conduzindo a um potencial aumento de capacidade do ATC.

Duas operações provenientes desta classe de aplicações, denominadas ‘Intercalar’ e ‘Permanecer em Trilha’, são alvo da investigação científica relatada nesta tese, e são apresentadas em maior detalhe a partir da seção 5.3.

2.2.3.3 Aplicações de Separação Aerotransportada

Nas aplicações de separação baseadas na aeronave, o ATCo delega parte de sua responsabilidade e transfere as tarefas de separação para a tripulação do voo, que passa a garantir que os mínimos de separação aplicáveis do espaço aéreo corrente sejam respeitados. A responsabilidade de separação delegada à tripulação do voo é especificada por uma nova autorização, que é específica para a aeronave designada, e delimitada no espaço e no tempo. Exceto para esta separação específica de uma aeronave designada como alvo, a separação da aeronave corrente com todas as outras aeronaves permanece sob responsabilidade do controlador.

É importante frisar a diferença entre separação e espaçamento. O espaçamento consiste em manter uma distância fixa, designada pelo ATCo, em relação a outra aeronave. A separação consiste apenas em garantir que a distância mínima entre uma aeronave e outra seja respeitada, sem o compromisso de manter um valor fixo de distância ou tempo.

2.2.3.4 Aplicações de Auto-Separação Aerotransportada

Aplicações de auto-separação baseadas na aeronave exigem que a tripulação de um voo separe a sua aeronave de todo o tráfego circundante, de acordo com os mínimos de separação e com as regras de voo aplicáveis para o espaço aéreo ocupado.

2.3 Considerações Finais deste Capítulo

O funcionamento dos sistemas modernos, atuais e futuros, de gerenciamento de tráfego aéreo, é bastante dependente dos meios de comunicação e processamento de dados. Isso faz com que o nível de segurança proporcionado pelos Sistemas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo seja fortemente influenciado pela disponibilidade e pela confiabilidade dos sistemas computacionais, incluindo hardware e software, que auxiliam as tarefas dos controladores de tráfego aéreo e dos pilotos.

3 Modelagem de Sistemas de Tráfego Aéreo

Este capítulo inicialmente expõe a necessidade de se manter uma separação espaço-temporal mínima entre as aeronaves e mostra como este requisito essencial de segurança pode ser representado em modelos de sistemas de tráfego aéreo.

3.1 Riscos do Tráfego Aéreo

O tráfego aéreo possui, como riscos intrínsecos, a ação isolada de cada aeronave, e aqueles provenientes da interação de diversas aeronaves. Dentre os primeiros, estão o risco de incêndio, a depressurização ou o choque com o solo, entre outros. Os acidentes deste tipo podem ser devidos a uma vasta diversidade de fatores, tais como pane em algum componente crítico da aeronave, mau tempo, ingestão de ave na turbina ou erros de tradução na comunicação entre pilotos e controladores de tráfego aéreo. Por outro lado, os riscos decorrentes da interação entre duas ou mais aeronaves podem causar colisão, desestabilização da aeronave, devida à esteira de turbulência de uma aeronave à frente ou à execução de uma manobra de desvio, ou ainda produzir forte desconforto aos passageiros.

3.1.1 Histórico e Classificação dos Acidentes Aeronáuticos

O número de acidentes aeronáuticos ocorridos entre 1984 e 2003, no tráfego relacionado a vôos regulares, é mostrado nas figuras 3-1 e 3-2 (ICAO, 2005). Na Fig. 3-1, observa-se uma considerável diminuição no número de acidentes fatais (80%) entre 1984 e 2003. Por outro lado, a diminuição no número de fatalidades nestes acidentes não seguiu a mesma proporção, apesar de ter sido também significativa. A desproporção entre essas duas quantidades se deve ao aumento do tamanho médio das aeronaves, que passaram a carregar mais passageiros neste período.

De acordo com Van Es (2003), 8% dos acidentes da aviação comercial entre 1980 e 2001, o que compreende a maior parte dos acidentes contabilizados nas figuras 3-1 e 3-2, estão relacionados com gerenciamento de tráfego aéreo (ATM). Dentre estes acidentes, que incluem também acidentes sem fatalidades, inferiu-se que a incidência de fatores causais primários é distribuída conforme a Fig. 3-3.

Fig. 3-1: Número de acidentes fatais a cada 100 mil horas de voo, em tráfego de vôos regulares (ICAO, 2005).

Fig. 3-2: Número de fatalidades de passageiros a cada 100 milhões de passageiros-quilômetro, em tráfego de vôos regulares (ICAO, 2005).

As categorias da Fig. 3-3 seguem a taxonomia da Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido. A inferência desta distribuição foi feita com uma amostra de apenas 33% dos acidentes relacionados com ATM, considerados no estudo de Van Es (2003). Para o restante dos acidentes, não houve informação suficiente para se deduzir as causas. A categoria Sistemas da Aeronave envolve falhas em qualquer equipamento da aeronave; a categoria Ambientais envolve baixa visibilidade e outros efeitos atmosféricos, e as duas restantes, ATC e Tripulação, envolvem falhas de operadores humanos, tanto do ATCo como dos pilotos.

Fig. 3-3: Distribuição dos grupos de fatores causais de acidentes relacionados com o gerenciamento de tráfego aéreo (VAN ES, 2003).

Ainda dentro dos acidentes relacionados com ATM, a distribuição de sua ocorrência por fase de voo é mostrada na Fig. 3-4. É interessante notar que a maioria deles ocorre quando as aeronaves estão em solo (Taxiamento).

Fig. 3-4: Ocorrência de acidentes por fase de voo, considerando (VAN ES, 2003).

Uma análise ainda mais específica dentro do conjunto de dados utilizado por Van Es (2003) é apresentada na próxima seção.

3.1.2 Acidentes Relacionados com Ausência de Separação Mínima entre Aeronaves

A ausência de uma separação espaço-temporal mínima entre aeronaves implica em um estado com alta probabilidade de colisão. Toda perda de separação mínima está relacionada com ATM.

A Tabela 3-1 contém um resumo de acidentes da aviação comercial no mundo entre os anos de 1980 e 1999, totalizando 420 milhões de vôos durante este período.

Tabela 3-1: Estatísticas de acidentes na aviação comercial (BLOM, 2004).

	Acidentes	Acidentes Fatais	Mortes
Total entre 1980 e 1999	2340	613	15.554
Média anual	117	30,7	777,7
Média por milhão de vôos	5,57	1,46	37,0
Relacionados com separação	7,9%	3,75%	5,0%

Dentre os acidentes relacionados com a perda de separação, podem-se distinguir alguns tipos, mostrados na Fig. 3-5. Nestes dados, nota-se o fato já esperado de que os acidentes envolvendo duas aeronaves no ar são os que apresentam o maior risco.

Fig. 3-5: Estatísticas de acidentes relacionados com perda de separação entre aeronaves e de aeronaves com veículos terrestres (BLOM, 2004).

A parcela de acidentes relacionados com a perda de separação entre aeronaves é relativamente baixa (7,9%). Entretanto, ela já é significativa e, além disso, o crescimento do volume total de

tráfego no futuro faz com que uma porcentagem como essa corresponda a um número de acidentes ainda maior de acidentes do que o número existente atualmente.

3.1.3 Níveis-Alvo de Segurança

A OACI estabelece níveis-alvo de segurança para a Aviação Civil, discriminados por fatores causadores. Por exemplo, ao se considerar os acidentes causados por perda de separação vertical entre aeronaves, o nível de risco aceito é de 5×10^{-9} acidentes fatais para cada hora de voo praticada (ICAO, 2001). Este nível, portanto, deve ser o limite máximo de risco praticado, mesmo que os critérios e procedimentos utilizados para garantir separação sejam modificados.

Os critérios mínimos de separação entre aeronaves, comumente adotados até cinco anos atrás, foram estabelecidos sobre a experiência prática acumulada do tráfego aéreo, sendo esta, por sua vez, baseada em conjuntos de tecnologias utilizadas desde a década de 50, sem grandes alterações estruturais. Alguns destes critérios são justificados física e matematicamente, como em situações onde a esteira de turbulência é o fator decisivo. No entanto, muitos dos critérios são de natureza empírica, como no caso das separações laterais (ROCKMAN, 1994). Para o caso das separações verticais, a baixa precisão do altímetro era o fator de maior relevância. Com o advento de altímetros mais precisos, foi possível demonstrar teoricamente que a separação vertical praticada em rota, que era de 2.000 pés, estava muito além de uma separação mínima razoável e, além disso, foi possível comprovar que 1.000 pés é uma separação mais que suficiente para garantir o nível-alvo de risco estabelecido pela OACI (ICAO, 1988). Por isso, desde então, a OACI começou a promover a certificação de aeronaves para utilizar os critérios RVSM (*Reduced Vertical Separation Minima*), que estabelece 1.000 pés como uma separação segura a ser praticada em rota. Grande parte dos espaços aéreos do mundo opera hoje com critério RVSM.

3.2 Malha de Controle Existente de Tráfego Aéreo

O comportamento do Sistema de Controle de Tráfego Aéreo pode ser entendido como uma malha de controle composta pelos principais atores do sistema: AOC, ATCo e Aeronave. Esta malha foi apresentada por Hansman et al. (1997) de uma forma bastante representativa, de acordo com a Fig. 3-6.

Fig. 3-6: Malha de controle existente de controle de tráfego aéreo, adaptada de Hansman et al. (1997).

Iniciando pelo canto superior direito da Fig. 3-6, os meios de Vigilância, utilizando o equipamento Radar e o ADS, fornecem a posição e a velocidade das aeronaves. Estas informações são processadas por Ferramentas de Auxílio, que têm a função de, primariamente, sintetizar informações e, dependendo do nível de automação, podem ter papéis de auxílio à decisão. As Fichas de Progressão de Voo contêm informações básicas sobre cada voo que está sendo realizado, e são geradas por requisição do AOC. Estas, uma vez aprovadas pela autoridade aeronáutica, são introduzidas no sistema de automação, para acompanhamento e transferência do voo entre sucessivos controladores, ao longo de todas as fases de voo. O AOC também fornece à aeronave o plano de voo previamente autorizado pela autoridade aeronáutica, podendo enviar alguns comandos para o piloto, referentes a possíveis alterações no plano de voo, e também obter informações sobre a evolução do voo (via *Datalink* ou canal de Voz).

As informações sobre as aeronaves e de auxílio à decisão são exibidas ao ATCo por meio de uma Interface Gráfica. Este se torna ciente da situação atual de tráfego e pode exercer influência na trajetória da aeronave, por meio de Vetores, que são alterações horizontais localizadas nas trajetórias, de Mudança de Nível de Vôo, ou de Emendas de Plano de Vôo, que são alterações de trajetórias um pouco mais complexas que podem envolver a alteração de toda uma sequência de pontos de referência.

O Piloto exerce o controle sobre a Aeronave em três níveis diferentes. Em nível de programação de navegação, o controle é feito por meio do CDU (*Control and Display Unit*), como interface, fornecendo os Comandos de Trajetória, e mais propriamente, por meio do Computador de Gerenciamento de Vôo. Este computador também recebe como entrada o estado da Navegação (posicionamento) da Aeronave, para fazer os ajustes necessários à trajetória. A partir destas entradas, o Computador de Gerenciamento de Vôo faz o seu processamento e fornece como saída o estado desejado da Aeronave, expresso em velocidade, rumo, razão de subida ou descida e altitude.

O controle do Piloto também pode ser exercido em nível de Comandos de Estado da aeronave. Este controle é feito por meio da interface MCP (*Mode Control Panel*), e do computador denominado Piloto Automático ou AFDS (*Autopilot Flight Director System*), que calcula uma atitude desejada para a Aeronave (ângulo de ataque*, inclinação lateral, força do leme, etc.) e o empuxo de motores para se obter o estado fornecido como entrada. A partir dos resultados destes cálculos, determina a ação a ser exercida nos atuadores para obter o estado requisitado.

O controle do motor, para se obter um dado empuxo, é feito por meio do computador denominado Empuxo Automático. Estes computadores recebem como entrada também os dados do Estado da aeronave (posição, velocidades e acelerações), para fazerem os ajustes necessários e assim manter a velocidade, altitude e outros valores de controle determinados pelo piloto.

A outra maneira de o piloto controlar a aeronave é por intermédio do Controle Manual, que aplica forças nas superfícies móveis de controle da Aeronave (como *aleirons*, profundor e leme), para que se obtenha um estado ou trajetória definida pelo Piloto.

* O ângulo de ataque é o ângulo formado entre a linha de corda da asa e o vetor de deslocamento da aeronave em relação à massa de ar circundante.

3.2.1 Plano Inicial de Vôo

São apresentados aqui os elementos de um plano de vôo, conforme exigido na aviação civil para autorização de tráfego. Estes elementos são descritos de maneira simplificada, para facilitar compreensão das informações essenciais neles contidas. As informações aqui apresentadas são requisitadas na elaboração do plano de vôo, segundo formulário padronizado pela OACI (ICAO, 2001), para vôos IFR. A Tabela 3-2 apresenta as principais informações que compõem um plano de vôo.

Tabela 3-2: Informações básicas de um plano de vôo.

Elemento	Descrição	Observações
Código de Identificação	Identificador do vôo	Atribuído pela autoridade aeronáutica, válido para um vôo, do início ao fim.
Aeroporto de Origem	Aeroporto de onde a aeronave vai partir	-
Horário de Partida	Horário em que a aeronave está pronta para partir	Horário em que a aeronave está estacionada, em que todos os passageiros, tripulantes e cargas estão a bordo, as portas fechadas, a aeronave está abastecida e livre de qualquer restrição externa para iniciar o <i>push-back</i> e sua movimentação em direção à decolagem.
Altitude de Cruzeiro	Altitude a ser praticada para a fase de cruzeiro	Requisitado pela operadora da aeronave, conforme regras de utilização de cada espaço aéreo e das rotas utilizadas, e sujeito à aprovação da autoridade aeronáutica.
Velocidade de Cruzeiro	Velocidade da aeronave a ser praticada para a fase de cruzeiro	Requisitado pela operadora da aeronave, restrita pelas regras de utilização de cada espaço aéreo.
Seqüência de Fixos	Seqüência de pontos geográficos pré-definidos, sobre os quais a aeronave vai passar.	Os fixos podem ser simplesmente posições convencionadas, ou podem estar definidos por equipamentos de auxílio à navegação, instalados no solo.
Aeroporto de Destino	Aeroporto onde a aeronave vai pousar	-
Tempo Estimado de Vôo	Tempo total de vôo, desde o início do taxiamento, até o pouso.	O tempo de vôo é estimado de acordo com o desempenho esperado da aeronave, e com o tempo estimado de deslocamento em solo, nos aeroportos de partida e de chegada.

3.2.2 Alterações no Plano de Vôo

Um vôo evolui condicionado pelos fatores atmosféricos e pelas condições de tráfego ao longo de suas diversas etapas. A influência que o tráfego exerce sobre uma aeronave é definida por alguns parâmetros que orientam o distanciamento a ser mantido entre as aeronaves.

3.2.2.1 Separação entre Aeronaves

Os parâmetros de separação entre aeronaves são recomendados por organismos reguladores como a OACI e devem ser ajustados ao ambiente específico de tráfego para cada região do espaço aéreo. Para o espaço aéreo brasileiro, esses parâmetros podem ser encontrados no documento (IMA-100-12, 1999). O distanciamento mínimo entre aeronaves, tecnicamente conhecido como separação, deve ser aplicado pelos controladores de tráfego aéreo, de acordo com as regras adotadas pela autoridade aeronáutica local. Para os espaços aéreos relevantes para este estudo, que estão sob cobertura de radar, pode-se dizer, de uma forma resumida, que as regras de separação destinam-se a evitar que uma aeronave (B) entre no volume de proteção de outra aeronave (A), conforme ilustrado na Fig. 3-7, considerando espaço aéreo de cruzeiro. A invasão deste volume, em situação atual ou prevista, é considerada uma situação de conflito.

Para que o volume de proteção de cada aeronave não seja invadido, é preciso que os controladores possam detectar uma futura invasão com uma antecedência de pelo menos 3 minutos.

Fig. 3-7: Volume de proteção da aeronave A, considerando espaço aéreo de cruzeiro.

3.2.2.2 Detecção de Conflito

Ferramentas como URET e MTCD (subseções 2.2.1.1 e 2.2.2.2) fazem detecção de conflito com até vinte minutos de antecedência, no máximo, utilizando algoritmos de detecção de conflito que levam em conta os planos de voo das aeronaves. Prandini e Watkins (2005) indicam que vinte minutos é o tempo máximo no qual se pode prever conflitos com uma precisão aceitável, uma vez que os fatores de incerteza se acumulam ao longo do tempo. Para mais detalhes sobre a detecção de conflito, vide seção 3.7.

Uma vez detectado o conflito, é preciso resolvê-lo com alguma manobra evasiva. Tais manobras podem ser executadas com níveis diferentes de automação e, dentre estes níveis, a seção seguinte aborda um nível de automação compatível com a proposta de Erzberger (2004).

3.3 Uma Proposta para Futura Malha de Controle de Tráfego Aéreo

Com o avanço do poder computacional disponível e das tecnologias de comunicação digital, espera-se implementar uma malha de controle diferente para gerações futuras de Sistemas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo. Tendo em vista as necessidades da nova malha de controle cujos elementos são propostos por Erzberger (2004), parece adequado fazer uma adaptação da malha da Fig. 3-6, para obtenção da malha da Fig. 3-8 (as diferenças estão destacadas em azul).

Na Fig. 3-8, diversos comandos que eram considerados ordinários na malha da Fig. 3-6, passam a ter o caráter de Exceção. Aqui, a maior parte das alterações de trajetória é feita por intermédio da Interface de Programação, que permite negociação de Emendas de Plano de Voo diretamente com as Ferramentas de Auxílio, que possibilitam um grau de automação consideravelmente maior do que na malha existente de controle. Os requisitos de implementação da Interface de Programação ainda não foram discutidos em detalhes nem nos meios de pesquisa aeronáutica, nem pelos organismos reguladores. A função desta Interface é facilitar a programação do Computador de Gerenciamento de Voo, a partir de definições de trajetórias enviadas pelo ATCS em mensagens de dados.

O Servidor de Trajetórias Automatizado (ATSH – *Automated Trajectory Server Host*) calcula trajetórias livres de conflito para aeronaves dentro de uma determinada região do espaço aéreo. Este Servidor realiza ciclicamente a detecção de conflito entre aeronaves, utilizando para isso os dados do estado corrente (posição, velocidade, altitude, etc.) e do plano de voo de cada aeronave. Caso haja alguma trajetória conflitante, o ATCo será advertido e o ATSH tentará calcular novas trajetórias, livres de conflito. A trajetória calculada será comunicada ao ATCo e ao Piloto. Feito isso, o Piloto irá visualizar graficamente a nova trajetória e deverá aceitá-la ou recusá-la, de acordo com as condições de segurança e do tempo adicional requerido, assumindo a responsabilidade em ambos os casos. A resposta de aceitação ou rejeição será imediatamente comunicada ao ATCo e será registrada na Base de Dados de Trajetórias. De acordo com Erzberger (2004), o processo que compreende a emissão de uma nova trajetória, aceitação pelo Piloto e início de execução transcorre em um tempo que é estimado em menos de dois minutos. O fluxo deste processo, deduzido a partir de Erzberger (2004), está representado na Fig. 3-10. Esta figura mostra, de forma sintética, a sucessão de eventos ao longo do tempo, a origem de cada evento e as ações disparadas por cada um deles. Os tempos t_1 , t_2 e t_3 são tais que $t_1 < t_2 < t_3$ e $(t_3 - t_2) < 2$ minutos.

O ATSH está sendo projetado para detectar conflitos em até vinte minutos de previsão a partir da posição corrente da Aeronave. As novas trajetórias geradas pelo ATSH são garantidas de estar livres de conflito nos próximos quinze minutos, apesar de que podem existir casos em que esta garantia seja possível de ser dada para um horizonte de apenas cinco minutos.

Pelo fato de o ATSH considerar um número muito grande de variáveis, ele será um software de alta complexidade. Sendo assim, não há como garantir formalmente de que o ATSH não ocasione, como exceção, algumas situações potencialmente perigosas de tráfego e, para evitar tais situações, o Ambiente de Garantia de Separação Tática (TSAFE) estará presente no sistema.

O TSAFE utiliza um conjunto de regras mais simples que o ATSH e atua para detectar e resolver conflitos que possam ocorrer até três minutos a partir do estado corrente da aeronave. Pelo fato de exigir um número bem menor de linhas de código que o ATSH, ele é passível de verificação exaustiva e, portanto, será um software, em tese, mais confiável, que age como uma salvaguarda para situações em que o ATSH não tenha solucionado o conflito.

Fig. 3-10: Fluxograma do processo de reprogramação de trajetórias, elaborado a partir da proposta de Erzberger (2004).

É possível notar que o modelo de Erzberger (2004) exige uma lógica confiável de reprogramação de trajetórias. Tal tópico é abordado com um pouco mais de detalhe na sequência.

3.4 Reprogramação Dinâmica de Trajetórias

A reprogramação dinâmica de trajetórias consiste em modificar a velocidade, o caminho e o perfil vertical de um voo, em relação ao procedimento autorizado e/ou esperado, programado anteriormente. Os voos comerciais, que operam segundo regras IFR (*Instrument Flight Rules*), devem seguir um plano de voo pré-estabelecido e autorizado pela Autoridade Aeronáutica antes de sua execução. No entanto, devido a incertezas operacionais, congestionamentos ou fatores climáticos, podem ocorrer situações como:

- O plano de voo não é cumprido devido a um comando do Centro Operacional da Companhia Aérea (AOC): a companhia que opera uma aeronave ordena que ela execute o voo fora do horário programado (comanda que a aeronave adie ou atrase o início do voo). Isto pode fazer com que a Autoridade Aeronáutica aplique multas à companhia, e a razão desta política é que o descumprimento do horário pré-estabelecido pode causar impacto no cumprimento de outros planos de voo.

- b. O plano de vôo não é cumprido devido a fatores externos à companhia: as causas podem ser climáticas ou de conflitos de tráfego. A aeronave fica impossibilitada de cumprir um plano de vôo por causa de células de mau tempo em sua trajetória, por causa de picos imprevistos de tráfego, ou simplesmente por causa de outros tráfegos conflitantes. Isto força a aeronave a executar o vôo com tempos diferentes dos que foram planejados. De uma maneira geral, os descumprimentos de plano ocorrem em situação de atraso e, muitas vezes, exigem esperas (no solo) ou em torno de pontos fixos (quando feitas no ar). A penalização, neste caso, ocorre de três maneiras diferentes: maior gasto de combustível, pagamento de horas extras à tripulação e pessoal de apoio e maior insatisfação do cliente.

As alterações dos planos de vôo estão presentes na malha de controle da Fig. 3-8, sendo realizadas por intermédio de “Emendas de Plano de Vôo”. Na maioria dos casos, a finalidade destas Emendas é evitar conflitos com outras aeronaves.

Observa-se que quaisquer das duas situações anteriores (**a** e **b**) causam prejuízo às companhias aéreas. Uma forma de reduzir o prejuízo é permitir, na situação **a**, que a companhia troque “*slots*” (intervalos reservados) de tempo, que ela tem reservados pela Autoridade Aeronáutica, entre vôos diferentes de sua responsabilidade. Isto significa que a companhia faz trocas de programação entre vôos próprios sem causar mudanças em vôos de outras companhias. Indo mais além, é possível inclusive negociar *slots* entre companhias, desde que isto não perturbe o fluxo de tráfego e seja vantajoso para todos os envolvidos. Na situação **b**, o prejuízo é diretamente proporcional ao gasto de combustível e horas extras pagas aos funcionários, e é também sofrido indiretamente pelo nível de insatisfação dos clientes. Estes prejuízos também podem ser mitigados pela troca de *slots*.

Por estes motivos, estão sendo realizados estudos sobre os benefícios e as formas de implementação da reprogramação dinâmica de trajetórias (SORENSEN, LIANG, CROOK, 2003), um meio importante para viabilizar a troca de *slots*. Se, por um lado, a reprogramação dinâmica de trajetórias busca otimizar a eficiência das companhias aéreas, por outro lado ela pode causar um aumento na carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo (vide seção 4.1.3.7) se não forem utilizadas as ferramentas de automação adequadas. De acordo com uma estimativa de Erzberger (2004), o envio de mensagens digitais do Controle de Tráfego Aéreo, do solo para a aeronave, contendo trajetórias para controle preciso de aproximação final, combinado com mecanismos de espaçamento automatizado das aeronaves, pode proporcionar um aumento de 25% na taxa de utilização das pistas dos aeroportos em horários de pico.

3.5 Impacto do Atraso da Execução de Manobras nos Ciclos de Detecção e Resolução de Conflito

O atraso do início de execução da alteração no plano de vôo é o tempo transcorrido entre o início do ciclo de detecção de conflito, instante em que são obtidas informações sobre a situação mais recente do ATCS, passando pela determinação de alterações na trajetória, levando em conta os conflitos possíveis, até o momento em que essa manobra é iniciada pela aeronave. Este tempo inclui a compreensão e a aceitação da manobra pelo Piloto, bem como o tempo de programação da manobra nos sistemas computacionais da aeronave, caso esta não seja uma manobra que necessite intervenção imediata nos controles manuais da aeronave. Define-se o símbolo τ_b para representar este intervalo de tempo.

É possível observar que o tempo τ_b gera importante impacto na execução da manobra de resolução, na diminuição do distanciamento entre as aeronaves e, por conseqüência, no risco de aproximação perigosa entre as aeronaves. Para isso, é adequada a apresentação do exemplo ilustrado nas figuras 3-11 a 3-14.

Fig. 3-11: Detecção de conflito devido a velocidades diferentes das aeronaves.

As etiquetas associadas às aeronaves das figuras 3-11 a 3-14 indicam as informações definidas na Tabela 3-3. O símbolo + junto à altitude, na etiqueta do vôo, indica que a altitude está aumentando, enquanto que o símbolo – indica que a altitude está diminuindo.

Tabela 3-3: Informações na etiqueta de identificação da aeronave.

TAM3963	—	Código de identificação da aeronave
Climb	—	Fase do voo (subida)
FL 295+	—	Altitude da aeronave, em centenas de pés, subindo
Kt 420	—	Velocidade da aeronave, em nós

No exemplo da Fig. 3-11, o sentido das trajetórias é da direita para a esquerda, e o segmento de trajetória realçado na cor vermelha indica a região de existência de conflito. Ambas estão com altitude crescente e, pelo plano de voo, de conhecimento do ATCo, é possível prever que vão atingir e manter a altitude de 33 mil pés (ou FL 330). Por algum motivo, a aeronave do voo TAM3963 não atingiu a velocidade prevista quando da obtenção da autorização do plano de voo e, por isso, aeronave do voo VRG2414 está se aproximando perigosamente por trás. O ATCo, com as informações providas por suas ferramentas de auxílio, prevê a situação de conflito futuro. A situação inicial de conflito é ilustrada na Fig. 3-12.

Fig. 3-12: Estado previsto de conflito.

Conforme se observa na Fig. 3-12, que representa a situação prevista após o instante da Fig. 3-11, o volume de proteção da aeronave do voo TAM3963, indicado em forma de círculo, está sendo invadido pela aeronave do voo VRG2414, e vice-versa. Para evitar esta situação, uma manobra que parece adequada, tanto do ponto de vista dos controladores como dos pilotos, é a ultrapassagem em nível (com as aeronaves em mesma altitude), conforme ilustrado na Fig. 3-13.

Fig. 3-13: Manobra de ultrapassagem para solucionar conflito.

De acordo com o atraso de execução τ_b , a alteração de trajetória de uma aeronave realizada pode resultar em um ou mais conflitos que, mesmo que sejam diferentes do conflito anteriormente detectado, resultam em proximidade perigosa das aeronaves e, além do mais, contribuem para aumento da carga de trabalho do ATCo. O atraso (τ_b) na realização da manobra de resolução está ilustrado na Fig. 3-14.

Fig. 3-14: Atraso de realização da alteração de trajetória e conseqüentes regiões de conflito, indicadas pelos segmentos espessos.

O novo conflito ocasionado por um valor excessivamente grande de τ_b (Fig. 3-14) também apresenta criticidade, o que não é desejável. Caso o controlador e os pilotos acreditem que a situação de conflito tenha sido eliminada e, em seguida, surja uma nova situação de conflito,

cuja detecção ocorra com pouca antecedência, aumentará o estresse de ambos na tentativa de encontrar soluções para este novo conflito e, conseqüentemente, aumentará a probabilidade de incorrência em erro. Por estes motivos, é preciso que os operadores humanos estejam devidamente treinados para responder pronta e corretamente às instruções de resolução de conflito.

3.6 Modelo Físico da Aeronave

Qualquer modelo realista de tráfego aéreo deve conter um modelo físico de controle de trajetórias de aeronaves. Este modelo deve ser detalhado o suficiente para gerar trajetórias numéricas próximas o bastante das trajetórias reais e, por outro lado, deve ter um nível de complexidade aceitável, caso seja utilizado em simulações aceleradas de tráfego, em que podem coexistir centenas de vôos sendo executados simultaneamente. Após um período de pesquisa em literatura sobre o modelo físico de aeronave, foi encontrado o modelo utilizado por Lygeros e Glover (2004), que possui uma boa relação entre precisão e simplicidade. Conforme estes autores, tal modelo representa com um bom nível de precisão as características da trajetória mais relevantes do ponto de vista do ATC (*Air Traffic Control*). Além disso, ele é compatível com o Modelo de Energia Total que dá suporte ao BADA (*Base of Aircraft Data*) do Eurocontrol (BADA, 2004). Entretanto, devido à necessidade de representar com maior precisão a influência que erros nos instrumentos de medida de velocidade e altitude da aeronave, foi utilizado o modelo descrito em (VAN DER GEEST, 2002), apresentado em detalhes no Apêndice A.

Existem inúmeros outros modelos físicos utilizados em análises de tráfego aéreo. A maioria das ferramentas disponíveis para análises de detecção e resolução de conflito (por exemplo, SIMMOD e RAMS) utiliza modelos ainda mais simplificados que os citados nesta seção.

Uma vez apresentado o modelo dinâmico de uma aeronave, é preciso estudar a interação espaço-temporal de duas ou mais aeronaves, que devem manter um distanciamento suficiente para não causar acidentes, nem incorrer em situações de alto risco.

3.7 Ferramentas de Simulação de Detecção e Resolução de Conflito

Conflito é a situação presente ou futura em que uma aeronave se encontra perigosamente próxima de outra. Os conflitos afetam a segurança, o custo e diversos outros aspectos do sistema de controle de tráfego aéreo. Ferramentas computacionais podem prestar um auxílio bastante significativo aos controladores na detecção e resolução de conflito, uma vez que o

controlador humano tem limitações na capacidade de estimar posições futuras de diversas aeronaves simultaneamente.

Conforme foi apresentado no Capítulo 2, diversas ferramentas em operação em sistemas de controle de tráfego aéreo têm funções de detecção e resolução de conflito. Estas funções foram concebidas a partir de modelos desenvolvidos para a configuração existente do sistema de controle de tráfego aéreo. Estes modelos podem ser usados, até certo ponto, para avaliar novas configurações de tráfego, novos conceitos de controle, ou mesmo um simples aumento no volume de tráfego, durante a fase de desenvolvimento das novas aplicações de tráfego aéreo, ou então, caso as novas aplicações sejam radicalmente diferentes, novos modelos podem ser desenvolvidos. Esta seção apresenta uma análise geral dos modelos existentes de detecção e resolução de conflito, extraída de (ODONI et al., 1997).

Para examinar o impacto potencial dos conflitos, e também para avaliar estratégias candidatas de resolução de conflito, é preciso utilizar modelos especializados. Estes modelos podem ser organizados de forma genérica em três blocos, mostrados na parte superior da Fig. 3-15.

Fig. 3-15: Blocos básicos de modelos de detecção e resolução de conflito (ODONI et al., 1997).

As trajetórias de aeronaves devem ser geradas com base em um modelo envolvendo parâmetros como tipo de aeronave, organização de rotas, etc. Dentro do conjunto de trajetórias, o modelo de detecção de conflito determina subconjuntos conflitantes. Dado este subconjunto conflitante, e o conjunto geral das trajetórias, o modelo de resolução de conflito permite encontrar soluções para os conflitos. Baseado na porcentagem de conflitos resolvidos, e nos níveis de risco oferecido pelas manobras de resolução, é possível obter métricas de desempenho, tais como taxa de ocorrência de acidentes (no âmbito da simulação).

Detalhando um pouco mais, tem-se a seguir os blocos básicos de modelos de detecção e resolução de conflito em tráfego aéreo:

1. Geração de Trajetórias: A densidade de tráfego em uma região do espaço aéreo, dada uma configuração de rotas ali praticadas, permite predizer o volume de intervenções que será requerido para manter a separação entre aeronaves. Modelos de configuração e fluxo de tráfego são necessários para determinar a frequência e a forma dos conflitos.

2. Detecção de Conflito: Algoritmos de sondagem de conflito precisam ser implementados em softwares que alertem os controladores e/ou pilotos sobre a existência de conflitos. Estas “sondas” se utilizam de informação de diversos sensores, como radar ou mesmo informações obtidas da instrumentação da aeronave (por exemplo, o caminho programado). O controlador e/ou o piloto recebem os alertas e julgam se precisa haver uma intervenção. Também existe a possibilidade de o próprio sistema iniciar intervenções. No entanto, este é um conceito de operação avançado e ainda está em estudos iniciais.

3. Resolução de Conflito: Uma vez detectado um conflito, é necessário um método de resolução. Para isso, é preciso elaborar uma solução e avaliar se ela assegura a separação efetiva entre as aeronaves e o impacto desta solução no tráfego ao redor. Adicionalmente, dependendo do ambiente ATM ali existente, é preciso avaliar como será feita a aplicação da resolução de conflito e como será o desempenho do ser humano neste processo de resolução.

Uma grande variedade de modelos de detecção e resolução de conflito foi desenvolvida, com diversos níveis de complexidade. Muitos destes modelos são *ad hoc* e foram utilizados apenas em estudos específicos, apesar de que eles podem ser generalizados para análises mais amplas. Outros modelos são mais generalizados e completos. No texto que segue, são apresentados apenas os modelos que possuem maior grau de maturidade e que são baseados em ferramentas de simulação conhecidas pela comunidade de ATM.

3.7.1 Ferramentas Existentes com Alto Grau de Maturidade

O relatório de Odoni et al. (1997) apresenta características de uma extensa variedade de modelos que permitem avaliar a aplicação de conceitos de Gerenciamento de Tráfego Aéreo. O citado relatório foi elaborado por diversos especialistas em tráfego aéreo e simulação, procurando ser o mais abrangente possível, tendo selecionado um conjunto de modelos que estejam presentes em ferramentas computacionais de simulação e análise. Tais ferramentas são reconhecidas e utilizadas em instituições reconhecidas de pesquisa em Tráfego Aéreo. Os

modelos/ferramentas apresentados nesta seção foram selecionados de acordo com a afinidade com os objetivos desta tese.

3.7.1.1 RAMS: Reorganized ATC Mathematical Simulator

O modelo do RAMS foi implementado como uma ferramenta geral de modelagem e simulação para espaço aéreo e aeroportos, capaz de simular também as tarefas e a carga de trabalho de controladores.

Dentro do ambiente RAMS existe um núcleo de simulação em tempo acelerado (*fast-time*) desenvolvido inicialmente pelo Centro Experimental do Eurocontrol em Brétigny (França) e pela companhia CACI, Inc., de Washington, e posteriormente aperfeiçoado pela ISA Software de Paris, que atualmente é a empresa responsável pelo desenvolvimento e distribuição do RAMS. Esta ferramenta, atualmente em sua versão RAMS Plus 5.27, é uma extensão do EAM (*Eurocontrol Airspace Model*), que por 15 anos foi a principal ferramenta de simulação do Eurocontrol para a avaliação de mudanças propostas na estrutura de espaço aéreo e configuração de setores, nos estados membros da Comunidade Européia.

O RAMS Plus trata todas as fases do voo, portão a portão, simulando desde o ponto de embarque dos passageiros no aeroporto de origem, passando pela movimentação em solo do aeroporto, decolagem, subida, fase de cruzeiro, descida, pouso, taxiamento e novamente deslocamento de solo até o ponto de desembarque no aeroporto de destino.

O RAMS Plus provê um ambiente de simulação flexível onde uma extensa variedade de novos conceitos de tráfego aéreo pode ser testada com um nível considerável de detalhamento. Devido à grande quantidade de parâmetros ajustáveis do RAMS (desempenho de aeronaves, tarefas do controlador, tipos de rotas, etc.), e de sua dependência de um sistema de condições e regras configuráveis, esta ferramenta é capaz de dar suporte a estudos de planejamento e organização de tráfego aéreo, sejam em alto nível ou detalhados, sobre uma grande variedade de conceitos de ATC. Seu projeto trabalha com perfis de voo em quatro dimensões (3 espaciais, mais o tempo), mecanismos de detecção e resolução de conflito, modelos de carga de trabalho, e uma interface amigável com o usuário. O pacote RAMS inclui também a ferramenta ATM Analyser, que permite análises avançadas dos resultados obtidos em simulação, por meio de relatórios que ela é capaz de gerar. Uma das análises que o ATM Analyser está pré-configurado para realizar envolve a Densidade Dinâmica, que é uma importante métrica de complexidade de tráfego aéreo (vide seção 4.1.4).

As ferramentas mais próximas do RAMS Plus são o TAAM, o ASIM, no que se refere ao espaço aéreo e, em um grau menor de proximidade, o SIMMOD.

Esforço de Aprendizado

O RAMS Plus requer um esforço de aprendizado relativamente modesto para sua utilização. De acordo com desenvolvedores, duas semanas são necessárias para um usuário médio se familiarizar com o RAMS Plus. Já os usuários da FAA relataram que 1 mês é necessário para estar realmente confortável na utilização do RAMS. A experiência pessoal do autor desta tese permite fazer o comentário de que o ajuste fino de seu sistema de condições e regras de detecção e resolução de conflito, uma característica avançada da ferramenta, demanda um tempo maior de aprendizado, acima de 2 meses.

Modularidade e Flexibilidade

Atualmente, a ferramenta RAMS Plus é um software de arquitetura fechada, isto é, desenvolvedores externos ao núcleo principal de desenvolvimento não podem incorporar ou modificar módulos. Ademais, o código fonte não é público, o que implica que não existe desenvolvimento independente.

Usuários

A comunidade de usuários do RAMS é grande, e uma amostra de seus membros está apresentada na Tabela 3-4.

Elementos de Validação do Modelo

O RAMS foi testado pela FAA em um estudo para a avaliação da eficiência de rotas diretas em operações de espaço aéreo na Nova Inglaterra, e relatou-se que é “a melhor ferramenta existente de simulação de espaço aéreo” (ODONI et al., 1997, seção 3.2.1, item 10).

Tabela 3-4: Usuários do RAMS em novembro de 2006 (fonte: Sítio Web <http://www.ramsplus.com>)

Agências e Institutos	Universidades
EUROCONTROL Experimental Center, França	Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris 6, França
EUROCONTROL Headquarters, Bruxelas	Indian Institute of Technology, Índia
EUROCONTROL CRDS, Budapeste	Università de L'Aquila, Itália
FAA Headquarters, Washington DC	Universidade Técnica de Berlim, Alemanha
FAA Tech Center, Nova Jersey	Delft University of Technology, Países Baixos
NASA Langley, Virginia	Hankuk Aviation University, Coreia
MITRE, Virginia	Hanseo Aviation University, Coreia
Air Services Austrália	Universidade de Beira, Portugal
AENA, Espanha	Glasgow University, Esócia
INECO, Espanha	Universidade Politécnica de Madri, Espanha
NATS, Reino Unido	Anadolu University, Turquia
NAV, Portugal	Cranfield University, Reino Unido
Serviços de Tráfego Aéreo da Suécia	Imperial College, London
ENAV, Itália	University of Sheffield, Reino Unido
SICTA, Itália	San Jose State University, EUA
ATSA, Bulgária	Virginia Tech University, EUA
ASECNA Dakar, Senegal	Universidade de Belgrado, Iugoslávia
ENRI, Japão	Universidade de São Paulo, Brasil
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil	

3.7.1.2 TAAM – Total Airspace & Airport Modeller

O propósito do TAAM é ser um sistema completo de simulação de tráfego aéreo. É um sistema extenso e detalhado desenvolvido por *The Preston Group* (TPG), em colaboração com a Autoridade de Aviação Civil Australiana. Atualmente, a licença do TAAM é comercializada pela Boeing.

O TAAM pode ser usado como uma ferramenta de planejamento de tráfego aéreo, ou para conduzir estudos de viabilidade de conceitos de ATM. O TAAM pode simular em detalhe a maior parte das funções de ATM, além de poder prover a criação de cenários para simuladores de ATC em tempo acelerado. As simulações abrangem todo o processo portão a portão, em um nível bastante detalhado.

Uma simulação do TAAM consiste de um cenário construído pelo usuário, composto da programação de vôos, descrição do ambiente, regras de controle de tráfego aéreo e opções de dados de saída. O TAAM executa a programação de vôos e obtém como resultado a utilização dos aeroportos e do espaço aéreo, fazendo a detecção e resolução de conflito, e calcula métricas com agregação de dados, por intermédio de algoritmos nativos e conjuntos de regras definidas pelo usuário.

Os módulos do TAAM incluem uma ferramenta gráfica e interativa de simulação em tempo acelerado, com visualização 2D ou 3D de espaço aéreo e aeroportos, e uma ferramenta de análise de dados capaz de gerar gráficos e tabelas a partir dos dados obtidos na simulação. As simulações podem ser interrompidas e retomadas a qualquer momento, e alguns aspectos básicos do modelo, como resolução de conflito e utilização do aeroporto, podem ser alterados, pois são controlados por bases de regras que podem ser editadas pelo usuário no meio de uma simulação. Os dados obtidos da simulação também podem ser usados por uma ferramenta de preparação de relatórios na forma de texto e construção de gráficos.

Dentre os dados obtidos em simulações do TAAM estão a movimentação das aeronaves, atrasos, conflitos, utilização de recursos de aeroportos, utilização de espaço aéreo, carga de trabalho de controladores, zonas de ruído e consumo de combustível.

Modularidade e Flexibilidade

O TAAM está disponível como um programa executável com arquivos de entrada e saída configuráveis. As regras da maioria das características são configuráveis. É possível utilizá-lo em conjunto com outros programas por meio dos arquivos de entrada e saída. Módulos adicionais permitem a interoperação com programas como o Modelo Integrado de Ruído da FAA (*FAA's Integrated Noise Model*).

Elementos de Validação do Modelo

Foram realizados com o TAAM estudos similares a estudos da FAA feitos com outras ferramentas de simulação de ATM. O modelo de simulação foi verificado por muitos usuários em uma grande variedade de cenários. Segundo (ODONI et al., 1997), a movimentação de aeronaves em 4-D (4 dimensões, sendo 3 espaciais mais o tempo) precisa ser ajustada para se obter uma melhor precisão, em torno de 3% a 4% de tolerância em relação às trajetórias reais de voo. A mesma meta precisa ser atingida para taxas de movimentação em aeroportos e em outras características da ferramenta.

3.7.1.3 ASIM: Airspace SIMulation

O ASIM é uma ferramenta de avaliação de complexidade de espaço aéreo, desenvolvida no Reino Unido pela Agência de Pesquisa em Defesa, para a Autoridade de Aviação Civil daquele país, o NATS (*National Air Traffic Services*). Foi projetada especificamente para estudar o impacto de novas estruturas de rotas presentes nas operações de espaço aéreo do

Reino Unido e usada para avaliar a complexidade dos novos modelos de espaço aéreo para o ano de 2015 em diante.

Hipóteses e Limitações

O modelo do ASIM assume uma estrutura fixa de vértices e arestas, definida pelo usuário, para as rotas e o espaço aéreo e, por este aspecto, guarda uma similaridade com o SIMMOD (vide seção seguinte). Esta ferramenta não leva em conta os detalhes de operação dos aeroportos e das áreas terminais, e também não possui modelo meteorológico e de carga de trabalho de controladores. Outro aspecto é a utilização de variáveis aleatórias para os horários de partida e para altitudes de aeronaves, cujo objetivo é gerar amostras representativas de tráfego.

Esforço de Aprendizado

De acordo com (ODONI et al., 1997), foi relatado que é possível, para usuários com conhecimentos básicos de ATC, tornar-se familiar com o ASIM em menos de um mês. Por outro lado, foi relatado pelos próprios desenvolvedores que a documentação desta ferramenta é deficiente.

Modularidade e Flexibilidade

O ASIM foi desenvolvido para os propósitos de pesquisa do Reino Unido. No entanto, de acordo com a equipe do NATS, seu desenvolvimento orientado a objeto permite fácil adaptação de sua funcionalidade a outras necessidades.

Elementos de Validação do Modelo

Não foram encontrados elementos de validação para o modelo implementado pelo ASIM. De acordo com os desenvolvedores, o ASIM deve ser considerado como uma ferramenta de pesquisa. Odoni et al. (1997) mencionam que esta ferramenta ainda requer um maior desenvolvimento.

3.7.1.4 SIMMOD – SIMulation MOdel

O SIMMOD é uma ferramenta voltada primariamente para simulação de operações em aeroportos e espaço aéreo terminal, mas também permite simulação de espaço aéreo para vôos em rota. O SIMMOD permite uma modelagem detalhada de operações em um aeroporto e sua área de movimentação terminal, e de uma rede regional de aeroportos, com os respectivos

espaços aéreos. Suas principais métricas de desempenho são tempos transcorridos de vôo, fluxos e capacidade de vazão ao longo do tempo, atrasos e consumo de combustível nos vôos.

O SIMMOD baseia-se em representações altamente detalhadas, em forma de grafos, com vértices e arestas, representando aeroportos e espaço aéreo. O tráfego se move ao longo da rede, sendo que cada vértice ou aresta (dependendo se é de espaço aéreo ou de aeroporto) pode abrigar somente uma aeronave por vez. Sempre que duas aeronaves convergem para o mesmo nó ou aresta, alguma estratégia internamente programada determina qual delas ocupará o nó primeiro, e qual delas sofrerá atraso. Os trajetos dentro das redes podem ser definidos pelo usuário ou determinados automaticamente pelo modelo, de acordo com o algoritmo de caminho ótimo de Dijkstra^{*}.

Muito do esforço associado à preparação de um cenário do SIMMOD é despendido no projeto da rede de tráfego. Por exemplo, se um padrão “em trombone” (múltiplas rotas próximas convergindo) precisa ser usado para melhorar o desempenho do sequenciamento de aproximação de um aeroporto, então todos os possíveis caminhos alternativos entre as rotas do trombone precisam ser explicitamente programados como parte da representação da rede.

O SIMMOD possui várias opções para simular eventos probabilísticos e pode prover estatísticas de saída altamente detalhadas. O SIMMOD também oferece recursos gráficos muito úteis para acelerar o processo de desenvolvimento da rede de tráfego.

Hipóteses e Limitações

Além do já mencionado fato de que uma aeronave deva se mover em uma rede discreta de nós e arestas, cujas regras de separação são pré-definidas, outra característica do SIMMOD é que os conflitos são essencialmente unidimensionais, sendo verificados apenas ao longo do caminho longitudinal da aeronave, sem possibilidade de verificação lateral ou vertical de conflitos.

Elementos de Validação do Modelo

O SIMMOD é uma ferramenta madura, tendo passado por várias revisões e melhorias ao longo de um período que vem desde o início da década de 1980 (ODONI et al, 1997). As suas versões mais recentes são a SIMMOD PRO! 7.1, e também a versão JSIMMOD, cuja licença é grátis para universidades, e tem código aberto, elaborado na linguagem Java.

^{*} Este algoritmo encontra um caminho com o menor custo entre dois nós de um grafo, considerando custos associados ao uso de cada aresta.

Uma importante validação do SIMMOD foi conduzida pela ATAC, a companhia desenvolvedora do produto, já no ano de 1988. A habilidade de fornecer resultados realísticos sob condições operacionais complexas foi confirmada repetidamente em uma série de estudos de simulação, da FAA, para espaço aéreo e aeroportos. Além disso, o SIMMOD conta com centenas de usuários registrados ao redor do mundo.

3.7.1.5 Comparação entre o RAMS e o SIMMOD

Considerando que RAMS e SIMMOD são duas maneiras diferentes de abordar problemas similares, e também dado o fato de que ambos oferecem licenças universitárias isentas de custo, é muito conveniente fazer uma comparação entre as duas ferramentas.

Os comentários apresentados nesta seção baseiam-se em Askovic (2002), e também em relatos pessoais de usuários de ambas as ferramentas.

Primeiramente, o RAMS possui uma facilidade superior de aprendizado e modelagem. Além disso, o que pesa negativamente para o SIMMOD é a construção da rede discreta de tráfego, nas quais todas as possibilidades de caminho precisam ser explicitadas.

Outra diferença muito importante entre o RAMS e o SIMMOD é o processo de detecção e resolução de conflitos. O RAMS apresenta uma complexidade de situações e possibilidades de conflito muito maior que o SIMMOD, uma vez que no RAMS o conflito é tridimensional e pode envolver controladores multi-setor, que coordenam grupos de setores. Esta complexidade pode pesar negativamente se o conjunto de regras de detecção e resolução não estiver bem ajustado, podendo levar a situações inverossímeis.

De uma forma geral, o SIMMOD é mais útil para analisar o tráfego no solo do aeroporto e realizar estimativas de baixa granularidade da distribuição do tráfego através dos setores, enquanto o RAMS é mais útil em análises detalhadas.

3.7.2 Resolução de Conflito Baseada em Regras

Foram apresentados, até o presente ponto, alguns modelos e ferramentas de detecção e resolução de conflito. A resolução de conflito consiste em alterações na trajetória que estava previamente planejada, com a finalidade de evitar a invasão do volume de proteção entre aeronaves. Por isso se diz que a resolução de conflito causa reprogramações nas trajetórias.

Existem diversas técnicas para se obter novas trajetórias que estejam livres de conflito. O tipo de técnica que mais se assemelha ao raciocínio dos controladores humanos de tráfego aéreo é

a técnica baseada em regras. Nesta técnica, existe um elenco de manobras padrão de resolução de conflito. A ferramenta de resolução de conflito fará a seleção da manobra mais adequada, de acordo com os parâmetros observados na situação de conflito que está sendo resolvida. As classes de manobras básicas disponíveis para resolução de conflito são três: mudança de direção horizontal, mudança de nível e alteração da velocidade.

A resolução de conflito baseada em regras funciona conforme a Fig. 3-16. O fluxograma nela presente é uma representação do processo de resolução de conflito do simulador RAMS Plus (RAMS, 2005). O sistema detecta o conflito e dispara o processo de resolução. Para que o processo de resolução se inicie, é preciso fornecer os parâmetros do conflito, que são os estados das aeronaves, incluindo posição, velocidade e atitude, os planos de voo que estão sendo seguidos, o tipo de espaço aéreo onde o conflito ocorre, e os tipos de aeronaves envolvidas. De acordo com estes parâmetros, são deduzidas informações como o ângulo formado entre as trajetórias, o ponto de maior proximidade e a velocidade relativa entre as aeronaves. Estas informações são utilizadas para classificar o conflito dentro de um conjunto de categorias de conflito.

Fig. 3-16: Detecção de conflito baseada em regras.

As informações categorizadas de conflito servem para ativar um conjunto de regras de resolução, ordenadas por prioridade. Cada regra contém uma manobra de resolução que é verificada em simulação, para comprovação de que o conflito é resolvido, e de que não surjam novos conflitos decorrentes diretamente desta manobra. Caso a aplicação de uma manobra resulte em ausência de conflito, é lançada uma Recomendação de Resolução para o controlador. De outra forma, o sistema procura, caso a manobra permita, modificar algum

parâmetro da manobra, como por exemplo, o ângulo de desvio, o nível de vôo, etc., dentro de uma faixa de valores aceitos. Se, mesmo assim, a situação de conflito continuar insolvente, a próxima regra, no conjunto de regras ativadas, na ordem de prioridade, é verificada. Este ciclo se repete até que se obtenha ausência de conflito ou até que se esgote o conjunto de regras ativadas. Neste último caso, o controlador receberá um alerta crítico de insolvência de conflito.

A seqüência temporal de cada etapa do ciclo de detecção e resolução de conflito baseada em regras está apresentada na Tabela 3-5. É importante observar aqui que o conjunto de manobras de resolução e de regras de ativação destas manobras é construído empiricamente, de acordo com a experiência dos controladores de tráfego aéreo. Por isso, não existe garantia de que o conjunto de manobras e a base de regras de ativação encontrarão soluções para todos os conflitos encontrados.

Outro ponto importante é que as manobras e as regras de resolução se aplicam a um conjunto 4-D finito, ou seja, um conjunto espaço-temporal limitado, onde podem estar duas ou mais aeronaves. Quanto maior o conjunto espaço-temporal considerado, maior é o esforço computacional de detecção de conflito e de verificação das manobras a serem aplicadas.

Tabela 3-5: Temporização do ciclo de detecção e resolução de conflito baseada em regras.

Entrada de dados	Etapas do ciclo de alteração de trajetória	Tempos iniciais	Intervalos
<ul style="list-style-type: none"> Estados das aeronaves - vigilância Planos de vôo 	<ul style="list-style-type: none"> Detecção de Conflito Classificação do Conflito 	t_0	τ_d
	Seleção e ativação inicial das regras de resolução	t_d	τ_b
<ul style="list-style-type: none"> Estados das aeronaves - vigilância Planos de vôo 	<ul style="list-style-type: none"> Verificação de Resolução Verificação de Novos Conflitos 	$t_r^i, i = 0, \dots, n_c$	
	Ajuste de parâmetros ou ativação da próxima regra	$t_v^i, i = 0, \dots, n_c$	
	Transmissão da alteração à aeronave	t_m	
Sensores e instrumentação da aeronave	Compreensão e aceitação do piloto	t_t	
	Programação do FMS ou piloto automático	t_a	τ_e
	Execução da manobra	t_p	

Todo o fluxograma da Fig. 3-16 é executado dentro do bloco “Ferramentas de Auxílio” da malha de controle de tráfego (Fig. 3-6 e Fig. 3-8), e também é compreendido pelos blocos

“Detecta Conflito” e “Calcula novas trajetórias” da Fig. 3-10. A Recomendação de Resolução pode estar sujeita a uma aprovação do ATCo, ou ser transmitida diretamente à aeronave, conforme o processo da Fig. 3-10.

De uma maneira ou de outra, entre o instante de transmissão da manobra de resolução do ATC para a aeronave, e o instante de início de execução da nova trajetória, ocorre uma tomada de decisão do piloto e, caso esta seja favorável à manobra recomendada, ocorre uma reprogramação de trajetória. Com o intuito de ajudar na elaboração de modelos de detecção e resolução de conflitos, foram definidas as variáveis da coluna “Intervalos”: τ_d é o período de detecção de conflito, τ_b é o período de preparação de resolução, e τ_e é o período de execução da manobra de resolução.

3.7.3 Eficiência da Resolução de Conflito

Desde que os conflitos sejam previstos com a antecipação necessária, eles podem ser resolvidos sem prejuízo para a segurança das aeronaves. A resolução de conflito exige alteração da trajetória 4-D de pelo menos uma das aeronaves envolvidas e, por isso, uma das aeronaves, pelo menos, acaba sendo penalizada por ter de executar uma trajetória mais longa, desacelerar/acelerar, alterar o nível de voo, etc. Tudo isso tem impacto no desempenho econômico da empresa que opera a aeronave.

Por causa do aumento do volume de tráfego aéreo, a resolução de conflito torna-se uma tarefa cada vez mais freqüente e assim, sendo o conflito uma situação ordinária de funcionamento do sistema, é necessário avaliar o impacto da resolução de conflito no desempenho do sistema de tráfego aéreo.

3.8 Considerações Finais deste Capítulo

Existem diversas ferramentas que permitem modelar a dinâmica das aeronaves e a interação destas em um ambiente real de tráfego aéreo. É possível observar neste capítulo que a maneira como as aeronaves interagem em um ambiente de tráfego é amplamente influenciada pela tecnologia e pelo nível de automação empregado nos sistemas de controle e vigilância. O próximo capítulo tem o intuito de apresentar análises de como a tecnologia pode influenciar no desempenho do sistema de tráfego aéreo.

4 O Impacto da Tecnologia nas Características do Tráfego Aéreo

Este capítulo mostra, por meio de alguns exemplos selecionados, o impacto que o uso de novas tecnologias causa no Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo, com o intuito de tornar clara a importância dos elementos tecnológicos no desempenho, na segurança e na qualidade deste sistema.

A evolução tecnológica no Sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo visa o aumento de eficiência, de segurança e de qualidade do sistema. Tais finalidades estão fortemente interligadas e, por isso, este capítulo foi elaborado de forma a mostrar a interdependência entre elas. A seção 4.1 apresenta uma abordagem generalista, mostrando diversos critérios utilizados para medir o desempenho do sistema de tráfego aéreo, enquanto que a seção 4.2 aborda especificamente os riscos de acidentes causados pelo ATC.

4.1 Análise de Desempenho de Tráfego Aéreo

Avaliação de desempenho do tráfego aéreo pode ser feita de acordo com duas classes de critérios. A primeira está relacionada ao custo operacional associado ao funcionamento do sistema de tráfego aéreo, que pode ser medido parcialmente pela quantidade de combustível gasto, e parcialmente pelo tempo gasto nos vôos. Já a segunda classe de critérios está relacionada à complexidade de gerenciamento de tráfego, que influencia a carga de trabalho dos controladores de tráfego aéreo e também dos pilotos. Esta subseção apresenta estudos de avaliação de desempenho no tráfego aéreo, cada qual baseado em algum modelo que pode ter sido desenvolvido previamente, ou desenvolvido *ad hoc*. Deu-se destaque nas seções seguintes para análises comparativas de cenários envolvendo implantação de novas tecnologias e/ou novos procedimentos.

4.1.1 Análise do Desempenho de CNS / ATM

CNS/ATM é uma abreviação de *Communication, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management* e representa um programa de modernização dos sistemas de gerenciamento de tráfego aéreo, em âmbito mundial, elaborado pela OACI (Organização da Aviação Civil Internacional).

Segundo Chin e Melone (1999), existe um consenso geral, entre a FAA (Federal Aviation Administration, EUA) e o mercado aeronáutico, sobre o enorme potencial de economia de

tempo e recursos associado à redução de restrições de controle de tráfego aéreo. Para dar suporte a isto, que se engloba dentro do paradigma *Free Flight* (RTCA, 2000), a FAA está investindo bilhões de dólares para introduzir tecnologias CNS/ATM no NAS (*National Airspace System*, EUA). É esperado que com a operacionalização destas novas características, os usuários poderão se beneficiar de melhores serviços, como trajetórias de cruzeiro otimizadas pelo vento de popa e movimentação mais eficiente nos aeroportos.

O trabalho de Chin e Melone (1999) descreve os resultados de um estudo sobre a economia de combustível e emissões de poluentes, associadas à implementação planejada das novas características do NAS (EUA). O trabalho foi baseado em modelos de simulação e ferramentas de gerenciamento de bancos de dados.

4.1.1.1 Descrição da Abordagem da Análise de Desempenho

Tomando como cenário base as características do NAS (EUA) em 1996, foi feita uma projeção do funcionamento deste sistema para os anos de 2005, 2010 e 2015, simplesmente fazendo o cenário com as tecnologias e organização de 1996 funcionar com o aumento de volume de tráfego previsto para os anos citados. Paralelamente, foi elaborada a análise para os anos citados, com os respectivos volumes de tráfego, mas incluindo as modernizações previstas. Entre estas estão o enlace digital entre aeronave e controle de solo, a vigilância automática dependente (ADS), bem como a navegação e a aterrissagem baseada em satélite. Além disso, também foi incluída na análise uma combinação de ferramentas de detecção e resolução de conflito, assim como de auxílio ao espaçamento e ao sequenciamento de aeronaves.

As economias de combustível e tempo foram geradas primariamente por meio de três modelos de simulação da FAA. O OPGEN (*OPTimal trajectory GENerator*) e o NASPAC (*National Airspace System Performance Analysis Capability*) foram utilizados para obter dados sobre os benefícios da modernização no gerenciamento do espaço aéreo, enquanto o PMAC (*Performance Monitoring and Analysis Capability*) foi usado para obter dados sobre os benefícios de melhorias na movimentação em superfície nos aeroportos. Outro modelo, desenvolvido pela MITRE (Corporação de Pesquisa dos EUA) foi usado para se obter dados sobre os benefícios relacionados com modernização das rotas oceânicas, para adaptá-las às novas tecnologias de navegação aérea.

Ainda, outro fator levado em consideração é a frota futura de aeronaves. Espera-se que, gradativamente, a eficiência dos novos motores vá aumentando e, também gradativamente,

motores menos eficientes sejam substituídos. O desempenho dos motores mais eficientes foi levado em conta progressivamente nos diversos cenários.

4.1.1.2 Resultados da Análise de Desempenho

A Tabela 4-1 apresenta os resultados da análise realizada por Chin e Melone (1999). Nela estão presentes os valores de combustível gasto, além da emissão de poluentes, como óxido de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO), em milhares de libras-peso por dia.

Tabela 4-1: Resultados de consumo de combustível e emissão de gases para as modernizações do gerenciamento do tráfego aéreo (CHIN, MELONE, 1999).

	Cenário Base				Melhorias CNS/ATM			
Ano	Combustível	NOx	CO	HC	Combustível	NOx	CO	HC
1996	305.805	3.712	3.772	754				
2005	351.964	4.708	4.373	854	-3,6%	-7,0%	-9,1%	-11,2%
2010	380.176	5.126	4.607	919	-5,5%	-9,5%	-11,9%	-15,9%
2015	399.157	5.399	4.706	937	-6,1%	-9,9%	-12,7%	-18,0%

A Tabela 4-1 tem dois grupos de colunas. O primeiro, o “Cenário Base”, contém os valores para o cenário tecnológico de 1996, com a quantidade de tráfego variando entre os anos de 1996, 2005, 2010 e 2015. O segundo grupo, denominado “Melhorias CNS/ATM”, contém as diferenças para o cenário tecnológico CNS/ATM, para cada ano, em relação ao Cenário Base. As porcentagens neste último grupo de colunas determinam a diferença no consumo ou emissão da substância indicada em relação ao Cenário Base. Para exemplificar, o gasto de combustível no ano de 2015 seria 6,1% menor do que o gasto de combustível que decorresse do uso do cenário tecnológico base naquele ano. Convertendo-se esta diferença em dólares de 1998, isso representa aproximadamente 1 bilhão de dólares por ano.

4.1.1.3 Comentários sobre a Análise de Chin e Melone (1999)

No contexto desta tese, é importante observar que os benefícios apresentados por Chin e Melone (1999) só podem ser obtidos se for comprovado que o uso de trajetórias mais diretas não aumenta a probabilidade de ocorrência de acidentes. Por falta de evidências de que as mudanças garantem os níveis de segurança atualmente praticados, não foram implantadas todas as modernizações descritas por Chin e Melone (1999) até a presente data (2007).

4.1.2 Análise de Desempenho de Resolução de Conflito

O estudo de Howell, Bennett e Bonn (2003) selecionou os benefícios que seriam obtidos em um sistema de ATM no qual as aeronaves são autorizadas a executar rotas mais diretas entre os aeroportos de origem e de destino. O benefício foi calculado por meio de se comparar a distância atualmente exigida para se navegar por pontos de rota pré-definidos, com a distância exigida para se navegar num sistema generalizado de rotas mais diretas, conforme previsto no *Free Flight* (RTCA, 2000). A diferença é ilustrada na Fig. 4-1.

Fig. 4-1: Comparação entre diferentes sistemas de rotas.

A estrutura de tráfego aéreo vigente atualmente, bem como a própria dinâmica do tráfego, impede, muitas vezes, a realização de trajetórias em grande círculo, que são as trajetórias consideradas mais diretas. Isto foi a principal motivação para a criação e o desenvolvimento do conceito *Free Flight*, onde haveria maior liberdade para as aeronaves executarem as trajetórias que forem julgadas mais convenientes pelos pilotos e companhias aéreas.

Dadas duas localizações geográficas, é possível determinar uma trajetória ótima que minimize o gasto de combustível e/ou o tempo de voo; a prioridade entre estes dois critérios seria estabelecida por cada companhia aérea. Contudo, tanto para o gasto de combustível como para o tempo despendido, a projeção da trajetória ótima na superfície terrestre é um grande círculo (desconsiderando a influência dos ventos). Caso todas as aeronaves, ou a maioria delas, executem caminhos que são segmentos de grande círculo unindo dois pontos, próximos ao aeroporto de origem e ao de destino, a geometria de conflitos entre trajetórias é modificada, e o esforço para resolver conflitos é diferente em relação ao modo de operação do

sistema existente. As manobras para resolução de conflitos, ao longo dos vôos, foram consideradas em ambos os casos, tanto no sistema corrente, como na operação *Free-Flight*.

O resultado final deste estudo é apresentado na Tabela 4-2, juntamente com resultados de estudos similares. A segunda coluna apresenta uma estimativa do montante monetário poupado em consequência do uso de rotas mais diretas; a terceira coluna apresenta uma estimativa do número de vôos diários, nos EUA, que são passíveis de utilização de rotas mais diretas; já a última apresenta o benefício monetário por vôo.

Tabela 4-2: Comparação de possíveis diminuições de custo, decorrente da execução de rotas mais diretas (HOWELL, BENNET, BONN, 2003).

Estudo	Benefício anual (milhões de dólares)	Número de vôos elegíveis por dia	Benefício por vôo elegível (dólares)
HOWELL, BENNET & BONN	699 – 786	39.753	51,3 – 57,6
Delta Airlines	42 – 92	2.000	61,2 – 134,1
MITRE ETMS	~ 700	29.045	70,3
MITRE TMAC	620	31.000	58,3
NASA Ames	107 – 279	5.399 – 9.488	57,8 – 85,7
Seagull Technology	557 – 652	40.437 – 50.157	37,9 – 40,1

4.1.3 Análise do Desempenho de LDRR (*Limited Dynamic Re-Routing*)

O objetivo desta outra análise é levantar informações sobre o impacto do conceito LDRR (*Limited Dynamic Re-Routing*) no provedor de ATS (*Air Traffic Service*) e no usuário do NAS (EUA), tendo sido apresentada por Sorensen, Liang e Crook (2003). O conceito LDRR envolve a tomada de decisão colaborativa (CDM – *Collaborative Decision Making*) entre o ATC e o AOC pelo uso do painel da aeronave, assumindo a presença dos equipamentos disponíveis no ano de 2003 para reprogramação dinâmica de trajetória. O AOC encontra trajetórias ótimas, a partir do estado corrente da aeronave, segundo seus critérios de conveniência. Esses critérios envolvem economia de combustível, compensação de atrasos, bem como outros aspectos relacionados. O AOC faz uma requisição ao ATC, em qualquer fase do vôo que sua aeronave esteja, para receber autorização para modificação da trajetória. Segundo o conceito LDRR, o ATC deve conceder a autorização sempre que esta modificação não resulte em violação de segurança e, desde que a complexidade do tráfego naquele setor não fique acima de certo nível de complexidade.

4.1.3.1 Hipóteses da Análise

As hipóteses assumidas no estudo de Sorensen, Liang e Crook (2003) são:

- a. Antes da partida o AOC elabora um plano de vôo para cada aeronave baseado na estrutura corrente de rotas, otimizando a trajetória ao máximo possível, no que diz respeito a desvios das áreas de tempo adverso e espaço aéreo restrito;
- b. O AOC, por intermédio do piloto, requisita uma nova trajetória sempre que o atraso do vôo exceda um determinado limite máximo de tempo. Isto é mais provável que ocorra quando eventos externos imprevistos acontecem como, por exemplo, uma manobra de resolução de conflito, um fechamento imprevisto de espaço aéreo sujeito a restrições, ou por algum fenômeno meteorológico também imprevisto;
- c. O AOC tem uma consciência situacional limitada dos eventos externos de tráfego e de certas alterações no uso de espaço aéreo restrito, mas normalmente tem suficiente consciência dos padrões meteorológicos que a aeronave encontrará pela frente. Conseqüentemente, será assumido que um plano de vôo otimizado, apresentado pelo AOC por intermédio do piloto, considera alguns, mas não todos os trechos que devem ser evitados;
- d. Uma requisição de nova trajetória não será permitida dentro de certa proximidade dos aeroportos de origem e de destino, onde um vôo deve seguir regras de controle de tráfego aéreo mais rígidas; e
- e. O controlador irá tentar autorizar a requisição, e irá normalmente conceder a autorização, a não ser que algum outro vôo seja afetado em uma situação de conflito iminente, ou a nova rota viole certas restrições procedurais.

4.1.3.2 Desenvolvimento do Cenário de Simulação de LDRR

No trabalho de Sorensen, Liang e Crook (2003), foram obtidos dados de planos de vôo de um dia de tráfego moderadamente intenso, com condições atmosféricas favoráveis, envolvendo 4 ARTCCs (Air Route Traffic Control Centers) centrais nos EUA (Kansas City, Denver, Minneapolis e Cleveland). Esta amostra captura a maior parte dos vôos de longa distância, costa a costa dos EUA, bem como vôos locais e regionais. Dos vôos internacionais, somente foram mantidos os que tivessem origem ou destino no México ou no Canadá. A ferramenta RAMS Plus foi utilizada por Sorensen, Liang e Crook (2003) para simular o cenário, e contou com adição de recursos para executar pedidos de reprogramação de trajetórias, buscas

adicionais de conflito, tarefas de alteração do plano de voo e tarefas adicionais de comunicação. O cenário de simulação incluiu 15.423 vôos.

4.1.3.3 Modelagem da Simulação

Nenhuma ferramenta de simulação em tempo acelerado existente pode representar todo o comportamento desejado para esta análise, que é baseado nas hipóteses acima enunciadas. Conseqüentemente, a abordagem foi tirar vantagem da modelagem distribuída resultante do projeto *OPGEN Dynamic Link* (BRADFORD, LIANG, MONDOLONI, 1998). Este projeto utilizou diversos modelos e ferramentas, cada qual representando um conjunto de características específicas do cenário.

4.1.3.4 Critério de Elegibilidade dos Vôos a Serem Otimizados

Foi assumido nesta simulação que somente uma classe de vôos pode ser otimizada. Os vôos desta classe devem ter as seguintes características:

- Distância total de voo maior que 400 Milhas Náuticas;
- Altitude de Cruzeiro acima de FL 240*; e
- Atraso mínimo em relação ao plano original deve ser de 5 minutos.

4.1.3.5 Questões Colocadas

A análise dos resultados procurou responder às seguintes perguntas:

- i) Qual a efetividade geral da estratégia de gerenciamento, em termos de gasto de combustível e de atrasos do tráfego?
- ii) Quais os impactos no provedor de serviço de tráfego aéreo e na segurança do tráfego, no que se refere à variação da carga de trabalho do controlador de tráfego aéreo, e na variação do número e da natureza dos conflitos?
- iii) Quais os benefícios específicos para os vôos que tiveram suas trajetórias reprogramadas?
- iv) Quão efetivas são as soluções parciais de tráfego quando a reprogramação é baseada em uma figura incompleta das situações corrente e futura?

Para responder às duas últimas perguntas, deve ser considerado que as decisões de reprogramação foram tomadas sobre informações incompletas, ou seja, não é possível prever

a situação do tráfego em toda a trajetória de uma aeronave. Além disso, foi preciso selecionar algumas métricas para responder às perguntas (i) a (iv) acima apresentadas.

4.1.3.6 Métricas Utilizadas

As métricas utilizadas no cenário apresentado foram:

Consumo de combustível, duração e distância percorrida dos vôos. A duração efetiva do vôo e a duração do plano inicialmente estabelecido foram utilizadas para calcular o atraso.

Ocorrências de Conflito. O número total de vôos envolvidos em conflitos, o número de conflitos e as características geométricas associadas como, por exemplo, o ângulo formado entre as trajetórias.

Carga de Trabalho. Foram registradas, com o uso do RAMS Plus, as tarefas tradicionais dos controladores de tráfego aéreo, como atribuição de níveis de vôo, recebimento da aeronave no setor, e também as tarefas mais modernas, referentes ao LDRR.

4.1.3.7 Resultado Geral da Análise

As medidas resultantes da análise da simulação estão indicadas na Tabela 4-3 e na Tabela 4-4. A Tabela 4-3 contém os resultados da aplicação do LDRR no desempenho dos vôos. Conforme se nota nesta tabela, uma leve deterioração do desempenho foi registrada, quando aplicado o LDRR, como o aumento do gasto de combustível, o aumento da distância média a ser percorrida por cada uma das aeronaves e um maior atraso dos vôos, conseqüentemente aumentando a duração média dos mesmos.

Tabela 4-3: Resultados gerais de desempenho dos vôos

Métrica	Mudança média
Consumo de combustível	+0,27%
Distância de vôo	+0,09%
Atraso do vôo	+0,14%
Média Geral dos Vôos	+0,15 minutos

A Tabela 4-4 mostra que, enquanto o total de conflitos e o número de conflitos ocorrendo dentro dos 4 ARTCCs centrais foi reduzido no cenário LDRR, a carga de trabalho dos controladores destes ARTCCs aumentou, e também houve um leve aumento do número de conflitos fora dos 4 ARTCCs.

* FL significa *Flight Level* e equivale a 100 pés. Dessa forma, FL 240 equivale a 24.000 pés.

Tabela 4-4: Impactos no provedor de ATS: Conflitos e Carga de Trabalho

Métrica	Mudança média
Número total de conflitos	-0,6%
Número de conflitos, apenas dentro dos 4 ARTCCs	-1,9%
Número de conflitos, fora dos 4 ARTCCs	+0,4%
Total de tarefas de ATC, somente para os 4 ARTCCs	+2,2%

4.1.3.8 Conclusão Geral do Estudo de Sorensen, Liang e Crook (2003)

Baseado nas circunstâncias individuais de cada voo, alguns voos foram beneficiados com o LDRR, enquanto outros mostraram diferença pequena ou negativa como efeito da reprogramação com consciência situacional limitada. Enquanto alguns voos otimizados (18%) puderam melhorar seu desempenho, se comparados com o a situação no cenário base, 53% dos voos que tentaram otimização acabaram com atrasos maiores do que aqueles que encontrariam no cenário base.

De uma forma geral, o número total de conflitos no cenário LDRR é menor que o do cenário base, como resultado da otimização. Isto produziu um pequeno impacto positivo também nos voos que não tentaram reprogramação.

Indicadores para os voos com desempenho prejudicado sugerem que um poder de previsão maior de impactos futuros como, por exemplo, uma melhor distribuição de informações de tráfego e de informações meteorológicas detalhadas, permitiriam que os voos fossem otimizados com melhores critérios e permitiriam aos AOCs planejarem mais eficientemente seus voos, de acordo com seus objetivos empresariais.

4.1.4 *Análise do Desempenho da Densidade Dinâmica (DD) e das Métricas de Complexidade*

Estudos como os de Kopardekar e Magyarits (2003) abordam o tema da complexidade de gerenciamento de um setor de espaço aéreo, que é medida através de um conceito denominado *Densidade Dinâmica* (DD – Dynamic Density). O estudo consistiu em, primeiro, identificar uma série de variáveis que pudessem compor a medição da complexidade dinâmica de um setor de espaço aéreo. Em seguida, uma série de amostras de tráfego aéreo de setores de 4 ARTCCs selecionados, nos EUA, foram avaliadas por aproximadamente 70 ATCos, dentre os quais diversos supervisores de equipe, os quais atribuíram níveis de complexidade para cada uma delas, em intervalos de 2 minutos. Usando um método de regressão linear, foi

determinada a relação entre as variáveis de complexidade dinâmica, inicialmente identificadas, e os níveis de complexidade atribuídos. As variáveis com maior correlação foram selecionadas e serviram para compor uma métrica unificada para a DD. Os resultados indicaram que a DD representa a complexidade de um setor de espaço aéreo melhor do que simplesmente a contagem do número de aeronaves presentes no setor, que é o método utilizado atualmente.

Um dos principais objetivos de se medir com precisão a complexidade de um setor é permitir o gerenciamento mais eficiente de alterações do fluxo de tráfego, causadas pelas incertezas inerentes ao sistema de tráfego aéreo. Uma das maneiras mais diretas de aumentar a eficiência do gerenciamento de tráfego é prever as situações futuras com antecedência. Por isso foi desenvolvido um modelo preditivo de DD, além do modelo instantâneo. As duas próximas seções abordam respectivamente cada um destes modelos.

4.1.4.1 Modelo Instantâneo de DD

O modelo instantâneo de DD, denominado de modelo unificado, é composto pelas variáveis presentes na primeira coluna da Tabela 4-5. Assumiu-se em (Kopardekar e Magyarits, 2003) que a função de DD é uma combinação linear destas variáveis, conforme a seguinte equação:

$$DD = C + \sum_i^n b_i x_i \quad (4-1)$$

Onde b_i são os coeficientes estimados para cada variável x_i , e C é uma constante estimada. Por causa da hipótese (4-1), foi executado um procedimento de regressão linear para obtenção dos coeficientes b_i . No entanto, como as variáveis têm faixas de valores diferentes, torna-se difícil ter uma noção do peso relativo que cada uma delas tem na composição de DD. Por isso também são utilizados os coeficientes normalizados β_i . Tais coeficientes resultam de uma transformação linear da equação (4-1), onde as variáveis x_i são transformadas de tal maneira que tenham média 0 e desvio padrão 1, o que resulta nas variáveis x'_i . A expressão DD' resultante desta transformação é apresentada na equação (4-2).

$$DD' = \sum_i^n \beta_i x'_i \quad (4-2)$$

Os demais dados da Tabela 4-5 são: σ_i , o desvio padrão da variável x_i ; t , que é a relação entre o coeficiente b_i e o desvio padrão da variável x_i ; e valor- p_i , que é uma medida padrão, adotada em procedimentos de regressão linear, como um critério de validade para a influência que

uma variável tem na variável dependente (DD'). Caso valor- p_i seja maior que 0,05, existe uma probabilidade considerável de que a aparente influência que a variável observada tem no valor de DD' seja mera coincidência estatística e, portanto, a variável deve ser descartada.

Tabela 4-5: Coeficientes da Equação de Regressão de DD e DD' (KOPARDEKAR, MAGYARITS, 2003).

Variável (x_i)	Metodologia de Cálculo	σ_i	b_i	β_i	t_i	Valor- p_i
Tipo de setor: 1=setor inferior 2=setor superior	Não se aplica (1 ou 2)	.084	.695	.254	8.306	.000
Número de aeronaves por setor, ao quadrado	FAA	.001	-4.406E-03	-.263	-6.371	.000
Número de aeronaves por volume do setor	TECH_CENTER_AD2	75.150	683.138	.242	9.090	.000
Volume do setor por aeronave	FAA	.000	-2.269E-04	-.648	-16.182	.000
Índice de graus de liberdade – baseado nas opções de manobra numa situação de conflito.	TECH_CENTER_DOFI	.003	-1.057E-02	-.056	-3.038	.002
Volume do setor	FAA	.000	1.865E-05	.643	14.170	.000
Número de aeronaves	NASA-1_C1	.229	1.161	.215	5.073	.000
Número de aeronaves descendo	NASA-1_C4	.132	.302	.044	2.279	.023
Métrica de proximidade vertical 1	NASA-1_C6	.055	.123	.028	2.247	.025
Métrica de proximidade vertical 2	NASA-1_C8	.017	4.819E-02	.040	2.799	.005
Métrica de proximidade horizontal 1	NASA-1_C9	.002	6.075E-03	.039	2.537	.011
Variância da velocidade	NASA-1_C14	.002	5.104E-03	.118	2.713	.007
Razão entre o desvio padrão da velocidade e a velocidade média	NASA-1_C15	.634	-1.907	-.161	-3.008	.003
Número de aeronaves com mudança no rumo maior que 15°	NASA-2_NH	.035	.128	.047	3.672	.000
Número de aeronaves com mudança na altitude maior que 750 pés	NASA-2_NA	.020	-5.408E-02	-.072	-2.739	.006
Número de aeronaves com distância lateral entre 0 e 25 milhas náuticas, e separação vertical menor que 2000 pés acima de 29000 pés, ou separação vertical menor que 1000 pés, abaixo de 29000 pés	NASA-2_S25	.028	8.303E-02	.045	2.962	.003
No. de aeronaves dentro de um setor	MET_ac_count	.023	.101	.161	4.392	.000
Número de aeronaves dividido pelo volume útil do espaço aéreo do setor	MET_density	.001	-6.411E-03	-.168	-7.943	.000
Número de outras aeronaves próximas de uma situação de conflito identificada	MET_conflict-neighbors	.020	-.118	-.260	-6.007	.000
Número de conflitos previstos dentro de uma distância limite da fronteira do setor	MET_conflict-near-boundary	.015	8.733E-02	.430	5.792	.000
Número de mudanças de direção, acima de um valor mínimo, de aeronaves dentro do setor	MET_heading-variation	.006	-1.867E-02	-.039	-2.888	.004
Contagem do número de aeronaves dentro de uma distância limite da fronteira do setor (por ex., 10 NM).	MET_boundary-proximity	.078	-.321	-.112	-4.118	.000
Diferença quadrática entre a direção de cada aeronave no setor e a direção do maior eixo do setor, ponderada pela razão de aspecto do setor	MET_airspace-structure	.003	3.257E-02	.215	10.506	.000
Constante C	Processo de regressão linear	.207	1.699		8.188	.000

4.1.4.2 Modelo Preditivo de DD

Após obter uma equação para a DD instantânea, o passo dado no trabalho de pesquisa apresentado por Kopardekar e Magyarits (2003) foi tentar prever a DD antecipadamente. Isto significa encontrar uma equação que, dadas as variáveis calculadas para o instante t , resulte no valor da DD para o instante $t + \Delta t$. Esta equação conta com a variável Δt , que é o tempo de antecipação. A introdução desta variável, gerando o modelo denominado “ DD antecipada”, causou uma melhora significativa na precisão e na estabilidade do valor da DD instantânea. Isto acontece porque na DD antecipada foi utilizada uma informação importante no

planejamento de mudanças de fluxo aéreo, composição das equipes de trabalho para cada setor, re-setorização dinâmica do espaço aéreo, e outras operações relacionadas, que contribuíram para a diminuição da DD instantânea.

Por outro lado, observou-se que a DD antecipada teve desempenho ligeiramente melhor que a métrica baseada somente na contagem prevista de aeronaves. No entanto, a contagem prevista de aeronaves é uma métrica bastante imprecisa e, como a DD antecipada é fortemente correlacionada com ela, ambas as medidas sofrem da mesma imprecisão. Para diminuir a imprecisão, Kopardekar e Magyarits (2003) recomendam utilizar dados de entrada mais refinados e técnicas de modelagem mais sofisticadas, como algoritmos genéticos, redes neurais e regressão não-linear.

4.1.4.3 Avaliação Subjetiva da DD

Com base nos mesmos dados explorados no estudo de Kopardekar e Magyarits (2003), outro estudo, de Masalonis, Callaham e Wanke (2003) tem uma abordagem distinta. Neste estudo, algumas variáveis são calculadas para serem utilizadas como múltiplos critérios de decisão para os controladores, ao invés de se utilizar o índice unificado DD. A importância de cada uma destas variáveis é determinada subjetivamente por meio de experimentos com equipes de controladores. Ao final dos experimentos, os níveis médios de importância atribuídos a cada variável foram consolidados, estando seus valores apresentados na Tabela 4-6.

Os níveis atribuídos na Tabela 4-6 registram o impacto que cada uma das variáveis causa na carga de trabalho dos controladores, numa escala de 0 (sem impacto) a 5 (grande impacto). O mesmo artigo registra que foram feitas análises específicas para cada um dos ARTCCs envolvidos e que os níveis de importância apresentaram pequenas variações de um para outro. Isto sugere que cada ARTCC pode selecionar as métricas mais importantes para tomada de decisão.

4.1.4.4 Comentários

O acompanhamento dos números apresentados ao ATCo por indicadores de DD podem contribuir em muito para manter sob controle o estresse do ATCo, uma vez que este pode tomar medidas preventivas para diminuir os indicadores de DD. Com um estresse baixo ou moderado, o sistema de tráfego aéreo apresenta condições de segurança significativamente melhores.

Tabela 4-6: Importância operacional dos fatores da DD, atribuída pelos controladores (MASALONIS, CALLAHAM, WANKE, 2003)

Variável	Nível Médio de Importância
Número máximo previsto de aeronaves	4,63
Porcentagem da capacidade indisponível do setor, devido a condição convectiva severa (presença de nuvens de chuva pesadas)	4,63
Condições adversas em aeroportos de destino dos vôos que atravessam o setor	4,63
Tráfegos com igual altitude em fluxos convergentes ou transversais	4,5
Impacto de tempo convectivo severo no setor	4,38
Número total de aeronaves (ocupação)	4,25
Pontos com vazão de partida de aeronaves, próximos ao setor	4,25
Pontos com vazão de chegada de aeronaves, próximos ao setor	4,13
Tráfegos de mesma altitude em proximidade lateral estreita	3,88
Confluências ou cruzamentos em ângulo fechado	2,43
Diversidade de tipos de aeronaves	2,48
Tráfego não estruturado por aerovias ou rotas usuais	2,25
Tempo médio no setor por aeronave	1,5

4.1.5 Análise do Desempenho da Inferência Bayesiana

Os fatores meteorológicos estão entre os que apresentam maior influência na segurança do tráfego aéreo. O trabalho de Pepper, Mills e Wojcik (2003) apresenta uma abordagem para tomada de decisão em gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo a partir de dados meteorológicos incertos. Esta abordagem utiliza redes bayesianas de inferência, e teve um protótipo desenvolvido para os setores de tráfego aéreo da região da Pensilvânia (EUA), envolvendo o tráfego na fase de cruzeiro. A utilização de redes bayesianas foi escolhida pelo fato de que as decisões em gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo são baseadas em uma grande quantidade de informações incertas.

O processo de decisão foi modelado em torno do processo de decisão Teleconferências de Planejamento Estratégico (SPT – *Strategic Planning Teleconferences*), que envolvem o ATCSCC (*Air Traffic Control System Command Center*), que é o comando central de ATC dos EUA, alguns ARTCCs, alguns TRACONs e Torres de aeroportos. Estas teleconferências ocorrem a cada 2 horas e a FAA lança um Plano Estratégico de Operações na hora seguinte. Este plano estratégico inclui iniciativas de gerenciamento de fluxo como programas de atraso em solo, inclusive com paradas intermediárias, reprogramações estratégicas e táticas de rotas, restrições de espaçamento, etc.

A Rede Bayesiana utilizada codifica as relações de probabilidades entre variáveis em uma rede causal. Dados bastante extensivos de eventos de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo, colhidos dos anos recentes, e o conhecimento de um processo bem definido de gerenciamento de fluxo, foram utilizados para validar esta rede de relações de probabilidade.

A rede foi configurada para representar a seqüência de previsões de condições atmosféricas, relatórios meteorológicos e decisões operacionais tomadas em casos reais.

O software Netica, desenvolvido pela *Norsys Software Corporation*, foi utilizado para implementar a rede, conforme ilustrado na Fig. 4-2. Nesta figura, são apresentados blocos de variáveis que influenciam nas tomadas de decisões de tráfego. Estes blocos estão dispostos em três séries horizontais (com blocos similares ao longo do tempo), indicadas com elipses: (a) a série de blocos de variáveis da Situação de Atrasos de Partida; (b) a série de blocos de variáveis medindo o Impacto da Situação Meteorológica Atual nas Rotas; e (c) a série de blocos referentes à Previsão do Tempo de áreas sujeitas a condição convectiva severa (nuvens de chuva pesadas), classificadas em níveis de densidade. Estas três séries influenciam as variáveis que registram as Decisões de Gerenciamento de Fluxo (d), presentes nos blocos da série indicada pela elipse na parte inferior da figura.

Observa-se que as variáveis nesta última série de blocos (d) influenciam as variáveis nos blocos da série no topo da figura (a), pois as decisões de fluxo de tráfego podem impor atrasos nas partidas de vôos. Outra influência que se observa é dos blocos de previsão de tempo (c) nos blocos de desvios de rotas causados pela situação meteorológica atual (b). Apesar de não haver causalidade física entre a previsão do tempo e a situação meteorológica futura, pode ser estabelecida uma causalidade lógica entre as variáveis destes respectivos grupos.

Após a realização de diversos testes da rede bayesiana, chegou-se à conclusão de que ela capturou alguns aspectos da tomada de decisão sob incerteza, mas não foi capaz de distinguir o impacto de decisões estratégicas, como por exemplo, a restrição de entrada de aeronaves em um dado setor, em termos de seu efeito no desempenho do sistema. Uma das explicações para isto é que não se utilizam informações de eventos passados para a inferência de decisões. Outra é que não foi feita uma análise sistemática da eficiência das regras de tomada de decisão no gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo.

Fig. 4-2: Rede Bayesiana para Tomada de Decisão de Fluxo de Tráfego Aéreo (PEPPER, MILLS, WOJCIK, 2003).

4.1.6 Análise do Desempenho do ASAS

A utilização do Sistema de Assistência de Separação Aerotransportado (ASAS – *Airborne Separation Assistance System*) é motivada pelo aumento da capacidade de tráfego proporcionada por ela. O projeto CoSpace, do Eurocontrol, desenvolveu diversas análises sobre seu impacto no desempenho do ATM. A seguir é apresentada a análise descrita na referência (CLOAREC, PURVES, VERGNE, 2004).

Esta análise teve como objetivo avaliar o impacto da utilização de procedimentos ASAS no gerenciamento de chegadas nos aeroportos Paris Charles de Gaulle (LFPG) e Paris Orly (LFPO), abrangendo um espaço aéreo próximo a estes aeroportos, denominado E-TMA (*Extended Terminal Movement Area*). A Fig. 4-3 mostra setores da E-TMA. Os setores em foco na análise são os setores AO1, AO2, AR1 e AR2, agrupados como S1 (AO1 + AO2) e S2 (AR1 + AR2). Os setores AO2 e AR2 alimentam os setores finais INIO e INIR, respectivamente.

A análise foi feita por meio de simulação em tempo acelerado, com a utilização do software de simulação RAMS Plus. Para obter o modelo de simulação adequado, utilizou-se um experimento prévio (realizado em 2002), em tempo real, que serviu como base para a determinação dos pesos atribuídos às tarefas de espaçamento.

Também foi realizada uma adaptação das regras de resolução de conflito empregadas, pois as regras padrão do RAMS Plus não estavam compatíveis com a execução real das tarefas realizadas na prática pelos ATCos dos setores de espaço aéreo da Fig. 4-3.

Explicando de forma resumida a metodologia, ela consistiu na simulação de algumas versões de dois cenários básicos: REF, que é o cenário de referência, sem procedimentos ASAS, similar ao cenário de tráfego aéreo existente atualmente; e o cenário AS (*Airborne Spacing*), onde é simulada a execução de tarefas ASAS.

Fig. 4-3: Espaço aéreo escolhido para estudo do desempenho do ASAS (PURVES, VERGNE, 2005).

4.1.6.1 Conclusões Gerais da Análise ASAS

Os resultados obtidos na análise de Cloarec, Purves e Vergne (2004) estiveram de acordo com o experimento de tempo real utilizado como base. Esta análise possibilitou que as mudanças introduzidas pelo uso do Espaçamento Aerotransportado, em dois setores de alta ocupação da E-TMA (S1 e S2), fossem avaliadas quantitativamente em termos de tempo trabalhado por setor, carga de trabalho dos controladores de cada setor e capacidade do setor de espaço aéreo. Estes números são indicadores com estreita relação com as condições de segurança no sistema de gerenciamento de tráfego aéreo.

Os resultados indicaram que o uso de Espaçamento Aerotransportado levou a uma clara redução na carga de trabalho do controlador táctico. No setor S1 a redução média na carga de trabalho foi de 10%, enquanto em S2 foi de 15%. Esta redução da carga de trabalho gerou um aumento de capacidade estimado em 12% para S1, e 15% para S2. Ainda é importante ter consciência de que a capacidade dos setores de uma TMA, bem como a das pistas de aeroportos, são os principais fatores limitantes da capacidade do Sistema de Tráfego Aéreo. Maiores detalhes sobre estes resultados podem ser encontrados em (CLOAREC, PURVES, VERGNE, 2004).

4.2 Análise de Risco em Novos Sistemas de ATM

A segurança (*safety*) é reconhecida como uma qualidade chave ao se selecionar ou projetar conceitos avançados de ATM (BLOM et al., 2001), mesmo quando a eficiência e a capacidade são os principais motivos do desenvolvimento de novas ferramentas. O nível de segurança exigido é freqüentemente descrito como ‘igual ou melhor’ em comparação com a prática existente, o que deixa margem a uma ampla variedade na forma como a segurança é expressa e medida. Com efeito, o desenvolvimento de novos conceitos de ATM são freqüentemente conduzidos sem uma análise sistemática de segurança. Equipes de projeto de ATM tentam obter melhorias na capacidade e na eficiência nos sistemas de controle de tráfego aéreo, por meio da exploração de novas tecnologias, alterando procedimentos dos controladores humanos e introduzindo novos procedimentos, enquanto se confia em indicadores simplistas relacionados à segurança de ATM, como freqüência de conflitos e seus tipos, carga de trabalho dos operadores humanos, bem como taxas de falhas e seus efeitos nos equipamentos.

No entanto, o ATM é o resultado de interações complexas entre diversos procedimentos, operadores humanos e sistemas, todos altamente distribuídos. Isto implica em que a obtenção

da segurança crítica é mais do que assegurar que cada elemento individualmente funcione de forma segura. É a interação complexa de todos estes elementos que determina a segurança final destes sistemas. A análise de indicadores isolados não basta para cobrir as complexas interações existentes no ATM, incluindo situações em estado degradado dos elementos. Para fazer uma análise mais completa, é recomendado lançar mão de uma metodologia de análise de risco que tenha sido desenvolvida especificamente para aplicação em ATM (ODONI et al., 1997).

A metodologia TOPAZ (*Traffic Organization and Perturbation AnalyZer*) foi desenvolvida com o intuito de atender aos requisitos de modelagem de sistemas distribuídos, de ocorrência de falhas e de operação em modo degradado, e foi aplicada com sucesso em diversas aplicações ATM (ODONI et al., 1997). Esta metodologia é utilizada nesta tese para estudo de novos conceitos de ATM (vide Capítulo 6).

4.2.1 Áreas de Aplicação da Metodologia TOPAZ

De acordo com Blom (2004), a metodologia TOPAZ foi aplicada em diversas áreas relacionadas com tráfego aéreo, cada qual com o suporte de uma ferramenta específica. A relação das áreas de aplicação da metodologia TOPAZ está apresentada na Tabela 4-7.

Tabela 4-7: Relação das áreas de aplicação da metodologia TOPAZ e as respectivas ferramentas de suporte.

Área de Aplicação	Ferramenta de Suporte
Aerovias paralelas em sentido oposto	ARIBA
Aeronaves equipadas para o <i>Free-Flight</i>	IFF
Risco induzido por esteira de turbulência	WAVIR
Pistas convergentes	SMA
Cruzamentos ativos de pistas	TAXIR
Tempo de Ocupação de Pista	Ferramenta desenvolvida pela Universidade George Mason (EUA)
Abordagem para abatimento de ruído	SOURDINE
Galileo	VALILEO

4.3 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou diversas análises e abordagens sobre o impacto de novas tecnologias no desempenho do tráfego aéreo. Várias das análises apresentadas demonstram que o uso mais intensivo de determinadas tecnologias e novos procedimentos pode proporcionar um significativo aumento na eficiência do tráfego aéreo. Também foi possível observar que a eficiência tem uma forte relação com a segurança do sistema e, conseqüentemente, com a capacidade do sistema de tráfego aéreo. Por isso, os estudos sobre os níveis de segurança de novas aplicações de ATM são de suma importância, já na fase de concepção destas aplicações.

No início deste trabalho de doutorado, era pretendido estudar, como uma das características de tráfego, a capacidade de se obter soluções de operações conjuntas de chegadas em aeroportos pelo uso de processamento inteligente e distribuído entre as aeronaves. Era esperado que, como resultado do trabalho, fosse proposta uma metodologia para que uma aeronave, conhecendo seus objetivos e uma figura parcial da situação de tráfego, pudesse estabelecer uma estratégia para atingir seus objetivos, sendo capaz de negociar com o ATC e também diretamente com outras aeronaves para isso (OLIVEIRA et al., 2004). Não foi encontrada nenhuma ferramenta que reunisse estas características e, por isso, partiu-se para uma implementação própria. Foram escritas 15 mil linhas de código Java para o software denominado CATS – *Continental Air Traffic Simulator*, que possui diversas características interessantes, como o uso de mensagens entre aeronaves seguindo os padrões de aplicações da OACI, navegação geodésica e possibilidade de se utilizar um número arbitrário de computadores, conectados em rede, para realização da simulação. No entanto, ao longo do segundo ano de trabalho, percebeu-se a implementação de uma ferramenta de tal porte era incompatível com a realização de um trabalho individual de doutorado.

Por isso, foram deixados de lado os requisitos de obtenção de solução por meio de processamento inteligente distribuído, e foram mantidos os aspectos essenciais do gerenciamento de tráfego aéreo nas Áreas Terminais.

Ademais, escolheu-se para estudo de caso nesta tese a análise de risco de uma operação ASAS, devido ao potencial apresentado na seção 4.1.6, e ao interesse da comunidade de ATM, expresso no documento (CARE, 2002), para a realização da análise de risco desta operação, que está descrita no capítulo seguinte.

5 Modelo Funcional Utilizado para Identificação de Perigos e Análise de Risco

Este capítulo apresenta o modelo utilizado para o Gerenciamento de Tráfego Aéreo considerado nesta pesquisa, desde o nível mais alto, envolvendo os principais atores do Tráfego Aéreo, até o nível dos equipamentos das aeronaves.

5.1 Malha de Controle de Tráfego Aéreo

A malha de controle de tráfego aéreo assumido para estudo nesta pesquisa é apresentada na Fig. 5-1.

Fig. 5-1: Malha de controle assumida para estudo.

A diferença principal desta nova malha, em relação à malha de controle corrente (Fig. 3-6) é a presença do ASAS (*Airborne Separation Assistance System*). O ASAS, em sua concepção, é um sistema que recebe como entrada a posição e a velocidade de outras Aeronaves próximas, o Estado da própria aeronave e, de acordo com os Comandos de Espaçamento e Separação fornecidos pela tripulação, fornece como saídas:

- a. Informações para o piloto em uma Interface Gráfica a respeito do estado das aeronaves próximas; e
- b. O estado-alvo da própria aeronave para que esta mantenha o espaçamento e a separação requisitada das aeronaves especificadas nos comandos.

A Vigilância Baseada na Aeronave, outro elemento da malha da Fig. 5-1, permite que uma aeronave conheça a posição e a velocidade das aeronaves circunvizinhas, à distância de até 250 NM. Esta vigilância é baseada em meios como ADS-B e radar Modo S (Sistema de Sinalização em Modo Seletivo), que é um sistema combinado de radar secundário de vigilância com um sistema de enlace de dados terra-ar-terra baseado em endereços seletivos de aeronaves. Neste sistema, cada aeronave envia uma mensagem de resposta somente se a mensagem de interrogação for endereçada a ela.

5.2 Algumas Responsabilidades dos Operadores Humanos

No sistema corrente de ATM, as tripulações são encarregadas do controle e da navegação eficientes de sua aeronave individualmente. Ao contrário dos controladores de tráfego aéreo, as tripulações atualmente não são responsáveis por manter separação entre aeronaves, mas apenas por evitar colisão entre elas (CARE, 2002). Uma nova alocação de tarefas entre os ATCos e tripulações é contemplada como uma possível opção para melhorar o ATM, em particular para otimizar o seqüenciamento de chegadas de aeronaves em aeroportos. Ela é baseada em algumas operações de Espaçamento ASAS, descritas na seção seguinte. Estas aplicações podem transferir partes distintas da responsabilidade de manter separação entre as aeronaves, do ATCo para a tripulação.

5.3 Operações de Espaçamento ASAS

O ASAS é visto como uma opção promissora no conceito futuro de ATM para prover um aumento na capacidade e na eficiência de tráfego aéreo (conforme explicado na subseção

4.1.6), bem como aumentar a segurança de vôo, explorando avanços da tecnologia embarcada da aeronave.

Existe um grande número de possibilidades na utilização do ASAS e, para ter um conhecimento mais extenso destas possibilidades, é recomendado ler a referência (ICAO, 2003). Nesta tese, entretanto, são abordadas somente as operações do ASAS denominadas ‘Intercalar’ e ‘Permanecer em Trilha’ (*Merge and Remain Behind*), dentro da categoria de Espaçamento Aerotransportado (vide seção 2.2.3), por se tratarem de operações com grande potencial para otimização da capacidade de tráfego dos aeroportos e das áreas terminais.

5.3.1 Intercalação ASAS

De acordo com (COSPACE, 2004), a operação de intercalação está descrita a seguir, válido para duas aeronaves em rotas confluentes.

Inicialmente, a intercalação em trilha envolve um ATCo solicitando à tripulação de uma aeronave (que será a ‘seguidora’) para que selecione uma aeronave próxima (que será a ‘líder’) como alvo em um CDTI (*Cockpit Display of Traffic Information*). Um exemplo da fraseologia desenvolvida é:

Controlador: “DLH456, selecione o alvo AFR123”

Piloto do vôo DLH456: “Seleccionando alvo AFR123, DLH456”

Uma vez que o alvo foi selecionado, o ATCo pode pedir ao piloto para ‘Intercalar’ atrás da aeronave alvo (líder), em um fixo à frente designado, mantendo um dado espaçamento em relação ao alvo. Um exemplo da fraseologia desenvolvida é:

Controlador: “DLH456, atrás do alvo, intercalar em WPT a 8 NM atrás”

Piloto do DLH456: “Intercalando em WPT, a 8 NM atrás do alvo, DLH456”

O espaçamento em relação à aeronave da frente poderia ter sido definido como uma distância em milhas náuticas (NM), ou como um intervalo de tempo. Além disso, de acordo com o conceito de responsabilidades atribuídas aos operadores humanos, o piloto pode aceitar ou não se engajar numa operação ‘Intercalar’ ou ‘Permanecer em Trilha’ ASAS.

Um exemplo de situação de Intercalação é ilustrado na Fig. 5-2. As duas aeronaves, a líder (sigla AFR123, velocidade 235 nós, altitude 4000 pés e descendo) e a seguidora (sigla DLH456, velocidade 250 nós, altitude 4100 pés e descendo), estão voando diretamente para o mesmo fixo (WPT). As velocidades estão indicadas em nós; cada nó equivale a uma milha

náutica por hora. As setas sólidas representam a posição e a direção correntes das aeronaves. As setas tracejadas representam as posições desejadas das duas aeronaves quando a líder atingir o fixo WPT. No momento em que a líder atinge o fixo, o espaçamento entre as aeronaves deve ser igual ao espaçamento desejado, dentro de uma tolerância definida. As aeronaves devem, neste caso, ter velocidades similares.

Fig. 5-2: Exemplo de ‘Intercalar’, envolvendo duas aeronaves.

Após o fixo, o problema é similar à situação de ‘Permanecer em Trilha’, isto é, cada aeronave segue sua própria trajetória em uma colocação de sequência, mantendo o espaçamento D entre ela própria e a aeronave imediatamente à frente.

Matematicamente, este conceito pode ser expresso como segue: sejam d_{seg} e d_{lid} as distâncias das posições correntes das aeronaves seguidora e líder, respectivamente, para o fixo de intercalação. Quando a aeronave líder atinge o fixo ($d_{\text{lid}} = 0$), o erro de espaçamento (d_{erro}), ilustrado na Fig. 5-3, é a diferença entre a distância existente entre a aeronave seguidora e o fixo (d_{seg}), e o espaçamento desejado ($d_{\text{espaçamento}}$), ou seja:

$$d_{\text{erro}} = d_{\text{seg}} - d_{\text{espaçamento}}, \text{ quando } d_{\text{lid}} = 0$$

Fig. 5-3: Ilustração do significado de d_{erro} .

A Fig. 5-4 mostra o CDTI (*Cockpit Display of Traffic Information*). A situação aqui difere um pouco daquela apresentada na Fig. 5-2, sendo que a aeronave seguidora está na linha central, abaixo, e a aeronave líder está indicada como uma seta ao final da linha diagonal à direita. O fixo de referência é ATN e, quando a aeronave líder estiver sobre este ponto, a aeronave seguidora deverá ter atingido o espaçamento requerido. O valor de espaçamento requerido (8 milhas náuticas) é exibido na escala de espaçamento à esquerda, em cor magenta. Nesta mesma escala, é apresentado em cor branca o espaçamento corrente (8,8 milhas náuticas), a velocidade relativa entre as aeronaves (9 nós), a tendência de diminuição do espaçamento, como uma seta em amarelo, e o limite máximo de tolerância do espaçamento, representado como uma faixa de contorno âmbar. Já na linha de trajetória da aeronave seguidora, ao centro, o símbolo γ indica o ponto onde o espaçamento requerido será atingido. A todo instante, o ASAS calcula a velocidade adequada para se atingir o espaçamento requerido, identificada na parte de baixo da tela como *SUG IAS* (*SUGgested Indicated Air Speed*, no exemplo, 305 nós). Este valor pode ser inserido diretamente pelo ASAS, por meio do barramento de comunicação da aeronave, no dispositivo de controle automático de velocidade, comumente conhecido como Piloto Automático, ou isso pode ser feito manualmente pelo piloto.

Fig. 5-4: CDTI em uma operação 'Intercalar' com duas aeronaves.

O exemplo apresentado da operação 'Intercalar' utiliza o critério de espaçamento em termos de distância (8 NM). Entretanto, este critério também pode ser expresso em termos de tempo (por exemplo, 90 segundos de espaçamento entre aeronaves).

5.3.2 Permanência em Trilha ASAS

'Permanecer em Trilha' é a segunda operação de Espaçamento Aerotransportado estudada (COSPAC, 2004). Inicialmente, esta operação envolve um ATCo pedindo ao piloto para selecionar uma aeronave vizinha como alvo no CDTI, da mesma forma que em 'Intercalar'. Um exemplo da fraseologia desenvolvida é:

Controlador: "DLH456, selecione o alvo AFR123"

Piloto do voo DLH456: "Selecionando alvo AFR123, DLH456"

Uma vez que o alvo foi selecionado, o ATCo pode então pedir ao piloto para manter uma determinada distância em relação ao alvo, ao longo da trajetória, ou um intervalo de tempo atrás do alvo. Neste caso, a fraseologia seria:

Controlador: “DLH456, atrás do alvo, permaneça a 8 NM atrás”

Piloto do voo DLH456: “Permanecendo a 8 NM atrás do alvo, DLH456”

A Fig. 5-5 ilustra a operação ‘Permanecer em Trilha’, onde a aeronave do voo DLH456 (velocidade 235 nós, altitude de 4.000 pés, descendo) permanece a $D = 8$ NM atrás da aeronave do voo AFR123 (velocidade 250 nós, 4.100 pés, descendo).

Fig. 5-5: Exemplo da operação ‘Permanecer em Trilha’ com duas aeronaves.

A Fig. 5-6 apresenta o CDTI para a operação ‘Permanecer em Trilha’. A aeronave seguidora está indicada pelo ícone na parte central inferior da figura, e a aeronave alvo (líder) está indicada pela seta próxima ao fixo OKRIX. A aeronave seguidora deverá seguir a mesma trajetória da aeronave líder, fazendo um desvio no fixo OKRIX e possíveis desvios posteriores. Dessa forma, a operação de ajuste de velocidade é realizada praticamente com posicionamento unidimensional.

Assim como na operação ‘Intercalar’, a operação ‘Permanecer em Trilha’ também pode ser praticada com o uso de critério de espaçamento em termos de tempo.

5.4 Benefícios dos Procedimentos de Espaçamento ASAS

É esperado que as os procedimentos de Espaçamento ASAS proporcionem maior segurança, melhor qualidade de serviço e aumento de capacidade (vide seção 4.1.6). É esperado também

que as tripulações ganhem em consciência e antecipação situacionais por tomarem parte ativa no gerenciamento de sua situação com respeito às aeronaves próximas.

O ASAS contribui para aumentar o nível de automação no tráfego aéreo, uma vez que, quando utilizado, os operadores humanos não necessitam realizar cálculos mentais para identificar conflitos ou proporcionar um espaçamento preciso entre as aeronaves. Estima-se que, uma vez que os primeiros procedimentos ASAS sejam utilizados na prática, serão propostas novas mudanças na estrutura de rotas e nos procedimentos de controle de tráfego aéreo, que sequer foram concebidas até a presente data.

Fig. 5-6: CDTI para uma operação 'Permanecer em Trilha', que envolve duas aeronaves.

5.5 Alguns Aspectos Técnicos do Espaçamento Aerotransportado

Dentro desta nova filosofia de controle de tráfego aéreo, do lado do ATCo, existem algumas modificações requeridas na interface do sistema de controle de tráfego aéreo. Uma das modificações requeridas é o conhecimento da existência ou não de equipamento ASAS nas aeronaves, como por exemplo, por meio de um campo indicativo na etiqueta de identificação da aeronave na tela radar do ATCo. Nesta mesma tela, é recomendável que exista indicação das situações de espaçamento de cada aeronave, distinguindo qual aeronave é líder, qual é seguidora, e qual não está realizando espaçamento ASAS, evidenciando a sequência de pouso,

que serve de suporte para a transferência de aeronaves entre setores. A Fig. 5-7, tomada de (COSPACE, 2006a), mostra como isso pode ser feito. Nela, aparecem as aeronaves como pontos brancos, ligadas às respectivas etiquetas de identificação.

A direção e a velocidade das aeronaves são indicadas, respectivamente, pela direção e pelo tamanho da barra branca junto às posições das aeronaves. Nesta figura, aparece uma sequência de sucessivos pares líder/seguidora, ligados pelas linhas em verde. Podem existir dois círculos verdes em torno das posições das aeronaves. O círculo menor indica que a aeronave é líder de outra aeronave (da aeronave seguinte na sequência); o círculo maior indica que a aeronave é seguidora de outra aeronave (da aeronave anterior na sequência).

Fig. 5-7: Tela do ATCo com indicação das aeronaves sob Espaçamento Aerotransportado.

Do lado do piloto da aeronave que recebeu a instrução de Intercalação ou Permanência em Trilha, o uso de instruções de espaçamento requer a exibição da aeronave alvo na cabine. O principal meio de vigilância aerotransportada será o ADS-B, no qual as aeronaves com o equipamento adequado transmitem mensagens ADS-B contendo posição e velocidade (e, eventualmente, sua trajetória futura). O ASAS fornece assistência ao piloto para manter o espaçamento requerido por meio de interfaces gráficas.

5.6 Detalhamento Técnico da Aplicação em Estudo

Antes de o ASAS ser realisticamente utilizado, restam a ser respondidas questões em diversas áreas, incluindo a sua implementação técnica, o redesenho do espaço aéreo, os custos e os benefícios financeiros a serem alcançados, as interfaces de operação, os procedimentos operacionais e, por fim, a análise de segurança, que é o foco deste capítulo. É preciso ser levado em conta que deve ser garantida a compatibilidade entre os sistemas e procedimentos presentes e os futuros (CARE, 2002). Por estes motivos, a principal pendência no estabelecimento de critérios de separação mínima aerotransportada é garantir operações seguras de voo. A determinação destes critérios não será uma responsabilidade da tripulação da aeronave. Ademais, a definição dos padrões de separação precisa levar em conta as capacidades de Comunicação, Navegação e Vigilância disponíveis a bordo.

5.6.1 Operação Considerada e Escopo da Análise de Risco

A operação considerada para análise de risco é a operação ‘Permanecer em Trilha’ do ASAS, brevemente descrita na seção 5.3.2, com espaçamento temporal (*Time-Based Spacing* ou TBS). A escolha desta operação foi feita pelos seguintes motivos:

1. Possui um grande potencial de aumento da capacidade das Áreas Terminais de Tráfego Aéreo (TMAs), decorrente da diminuição da carga de trabalho do ATCo tático e do aumento da precisão no espaçamento entre aeronaves de uma sequência de chegada; e
2. De acordo com uma extensa pesquisa bibliográfica no campo das aplicações ASAS, não foi realizado estudo anterior a este envolvendo o cálculo da probabilidade de colisão (risco) das operações de Espaçamento Aerotransportado.

5.6.2 Descrição da Operação de Permanência em Trilha do ASAS

Esta subseção apresenta uma descrição mais detalhada da operação ‘Permanecer em Trilha’ realizada com o ASAS.

Esta operação exige a atribuição à tripulação da aeronave a tarefa de manter um espaçamento fixo em relação à aeronave da frente, o que é parte das responsabilidades de separação no tráfego aéreo. Para isso, é essencial identificar todo o equipamento e os elementos operacionais requeridos para que as tripulações assumam a responsabilidade por esta tarefa, denominada Espaçamento Aerotransportado (CARE, 2002).

Está sendo considerado neste capítulo o Espaçamento Temporal (TBS) na Área de Movimentação Terminal Estendida (E-TMA). O TBS procura delegar à tripulação a tarefa de manter um tempo preciso de espaçamento em relação à aeronave que está convergindo para ou alinhada à frente na mesma rota de chegada a um aeroporto. Estudos relatam que o espaçamento temporal é preferido pelos controladores de tráfego, em relação ao espaçamento baseado em distância, pois facilita a uniformidade do espaçamento entre aeronaves, as quais naturalmente variam sua velocidade em decorrência da variação de altitude nos procedimentos de descida em aproximação (IVANESCU et al., 2005; GRIMAUD et al., 2003), e em decorrência da existência de ventos. O TBS considerado neste capítulo é aplicado na TMA Estendida (E-TMA) e vai até o Fixo de Aproximação Final (FAF – *Final Approach Fix*), onde o procedimento de TBS é encerrado.

Neste período de tempo, como em outras fases do voo, a tripulação deve estar ciente das aeronaves circunvizinhas, por meio da síntese de tráfego disponível na Tela de Informação de Tráfego do Cockpit (CDTI). É assumido que o ASAS está funcionando no modo de Espaçamento Aerotransportado (que é um dos seus possíveis modos de funcionamento), bem como que a tarefa de detecção de conflito, atribuída ao ATCo, está implícita na iniciação do procedimento.

Conforme apresentado na subseção 5.3.2, a operação ‘Permanecer em Trilha’ (por exemplo, usando TBS) envolve dois passos. No primeiro passo, o ATCo instrui a tripulação para identificar uma aeronave próxima como alvo, o que é feito por intermédio do CDTI. Estando ciente do alvo requerido, a tripulação deve selecioná-lo no ASAS, e notificar a seleção do alvo ao ATCo. No caso de a tripulação achar que a seleção do alvo requerido pode levar a uma execução inconsistente do voo, ou mesmo não encontrar o alvo no CDTI, ele solicita esclarecimento ao ATCo. Nestes casos, o procedimento TBS seria adiado ou abortado. Caso a tripulação faça a seleção do alvo sem encontrar nenhum problema, ela irá notificar o fato ao ATCo com uma frase semelhante a um cotejamento (repetição da instrução para verificação do correto recebimento), mas, no entanto, indicando que a seleção já foi realizada (vide exemplo na seção 5.3.2).

Em um segundo passo, após o ATCo ter ouvido a notificação de execução da seleção de alvo, ele irá instruir a tripulação para atingir e manter um espaçamento temporal atrás da aeronave alvo. A tripulação deve inserir este valor no ASAS, que então passará a calcular a velocidade requerida para manter o espaçamento. A partir deste ponto, dois modos de funcionamento podem ser aplicados: em um deles, o ASAS apenas indica a velocidade requerida, e o piloto

aplica os ajustes necessários manualmente no sistema de piloto automático; em outro modo, o ASAS transmite diretamente a velocidade requerida ao sistema de piloto automático, sem a necessidade de intervenção do piloto, que passa apenas a monitorar o comportamento da aeronave durante os ajustes de velocidade. Neste estudo de caso, somente o segundo modo, com ajustes automáticos, será considerado.

Conforme a descrição da operação ‘Permanecer em Trilha’, assume-se que tanto a aeronave seguidora como a aeronave líder estão seguindo a mesma rota de aproximação, para o mesmo aeroporto. Enquanto monitora o procedimento TBS, a tripulação também monitora a correta execução do plano de voo, que deve possuir propriedades RNP-1. A navegação RNP-1 significa que a aeronave é capaz de manter-se 95% do tempo de voo a uma distância de menos de uma milha náutica da linha de rota idealmente traçada.

O procedimento TBS pode terminar normalmente no FAF, ou eventualmente antes, caso ocorra alguma falha no sistema ASAS, ou seja detectado algum perigo pela tripulação ou pelo ATCo. Nos casos de término anormal, o ATCo seguirá procedimentos convencionais para espaçar as aeronaves. Neste estudo, apenas um único fluxo de aeronaves é considerado, sem cruzamento de outras rotas.

5.6.3 Papéis e Responsabilidades dos Operadores Humanos

Os atores de um procedimento TBS e seus papéis podem ser definidos da seguinte forma:

- a) O ATCo tem o papel de iniciar o TBS e de monitorar o espaçamento entre as aeronaves que estão neste procedimento de espaçamento. Ele também tem como tarefa manter o espaçamento de outras aeronaves que estão na rota de aproximação, mas não estão seguindo neste procedimento TBS;
- b) A tripulação da aeronave seguidora tem o papel de assegurar que a própria aeronave demonstra estar executando a rota designada em RNP-1. Esta tripulação também tem o papel de executar as instruções do ATCo para inicialização do TBS e, então, de manter o espaçamento designado em relação à aeronave líder. No caso de impossibilidade de inicialização ou execução do TBS, devido a razões detectadas pela tripulação, esta é responsável por notificar o ATCo sobre este fato;
- c) A tripulação da aeronave líder tem o papel de assegurar que a própria aeronave demonstra estar executando a rota designada em RNP-1. Esta tripulação também pode estar envolvida em outro procedimento TBS como seguidora; e

- d) A tripulação de uma aeronave seguindo a mesma rota de aproximação, mas que não está envolvida em um procedimento TBS, tem apenas o papel de assegurar que a própria aeronave demonstra estar executando a rota designada em RNP-1.

É preciso dizer que todas as tripulações devem executar quaisquer instruções do ATCo, exceto em casos em que seja detectado com forte evidência que a execução de uma instrução leve a uma situação insegura.

5.6.4 Equipamento Requerido para as Aeronaves

É assumido que as aeronaves estão equipadas com equipamentos padrão de Comunicação e Navegação, como por exemplo, Rádio-Telecomunicação por voz (R/T – *Radio Telecommunication*), Sistema de Referência Inercial (IRS – *Inertial Reference System*) e ainda ADS-B e ASAS. Os sistemas de solo possuem equipamentos padrão de vigilância na TMA, mais a contraparte de solo do ASAS (vide Fig. 5-7). Uma relação simplificada dos equipamentos necessários para a Aeronave e para o Sistema de Controle de Tráfego Aéreo em solo segue na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Equipamentos utilizados na operação ASAS em estudo.

Equipamento	Aeronave	Solo
Radar Primário	-	Sim
Radar Secundário	-	Sim
Transponder	100%	-
Transmissor ADS-B	100%	-
Receptor ADS-B	100%	-
ASAS	100%	-
ASAS de solo	-	Sim
ACAS*	100%	-
FMS**	100%	-
GNSS	100%	-
IRS	100%	-
R/T de voz	100%	Sim

* *Airborne Collision Avoidance System*

** *Flight Management System*

5.6.5 Desempenho das Aeronaves

Um importante elemento para o funcionamento do ASAS é o desempenho da aeronave. Se o desempenho das aeronaves de um par de aeronaves líder/seguidora for muito diferente, não será possível aplicar o TBS. Por exemplo, não é recomendado fazer uma aeronave a jato de grande porte seguir um pequeno turbo hélice, ou vice-versa, pois as respectivas velocidades

normais de operação são muito diferentes. Sendo assim, não seria possível manter a separação temporal requisitada pelo ATCo.

O presente estudo considera pares de aeronave a jato de médio porte (M na classificação ICAO), que representam a maior parte dos pares de aproximação nos grandes aeroportos, atingindo mais de 60% dos casos, segundo Jeddi, Shorttle e Sherry (2006).

A dinâmica de voo de uma aeronave típica considerada neste trabalho e os seus sistemas de controle de voo estão descritos no Apêndice A.

5.6.6 Elementos Funcionais do Ambiente ASAS

Com o objetivo de identificar os elementos funcionais do ambiente ASAS e entender o papel de cada um deles, elaborou-se o diagrama da Fig. 5-8. Nesta figura, 9 grupos principais estão desenhados: Tripulação, Controle da Aeronave, CDTI & Alertas de Áudio, ASAS, ACAS, Navegação, Comunicação, Sistemas ATS e ATCo Tático. No grupo **Tripulação**, identificam-se dois elementos, o Piloto Operador e o Piloto Monitorador. O Piloto Operador é aquele que, em um dado momento, tem a tarefa de operar diretamente os controles da aeronave, sendo responsável imediato por manter ou alterar a trajetória da aeronave, seja por meio do FMS, por meio do Piloto Automático, ou por meio dos Controles Manuais, que estão no grupo **Controle da Aeronave**. Já o Piloto Monitorador tem a função de monitorar o funcionamento da aeronave e das condições de voo, além de realizar toda a comunicação da aeronave com o ATCo. Nas Aplicações ASAS, o Piloto Monitorador é o principal responsável por operar este sistema, que gera como saída a síntese de tráfego, alerta e indicações de conflito, exibidos no **CDTI** ou emitidos em **Alertas de Áudio**. O **ASAS**, quando utilizado para auxiliar no gerenciamento do Espaçamento entre aeronaves, fornece velocidades requeridas para manter o espaçamento, as quais são calculadas pelo Rastreamento do estado das outras e da própria aeronave. O **ASAS** também pode alimentar diretamente o Piloto Automático, dependendo da configuração do sistema. Por outro lado, o **ACAS** gera TAs e RAs (*Traffic Advisories* e *Resolution Advisories*) com o objetivo de evitar colisão, também com base no Rastreamento do estado das outras e da própria aeronave, tendo um papel complementar ao do **ASAS**.

Fig. 5-8: Elementos funcionais das aplicações de Espaçamento Aerotransportado.

Também estão presentes na Fig. 5-8 o sistema de **Navegação** da aeronave, que tem como fontes de dados os acelerômetros do Sistema Inercial, os Sensores de Pressão (Altímetro e Tubo de Pitot) e o Receptor GPS. Todos estes dados são processados para se sintetizar a posição e o vetor velocidade mais prováveis da aeronave.

A aeronave também necessita dos sistemas de **Comunicação**, que incluem o receptor e o transmissor ADS-B, o transponder Modo S e a respectiva Antena, além do equipamento de rádio (R/T) para canal de voz.

Na área comum do sistema, que é compartilhada entre diversas aeronaves, estão presentes no grupo **Sistema ATS**: os Satélites de Navegação, os Sistemas de Vigilância ATC de solo (radares, receptores ADS-B, sistemas de rastreamento, ferramentas de automação, etc.) e o equipamento de Radio Telecomunicação (R/T), necessários para as tarefas do **ATCo Tático**, que controla o tráfego em um determinado espaço aéreo.

5.6.7 Diferenças entre o conceito operacional aqui utilizado e o conceito operacional a ser implementado

No conceito operacional real de Espaçamento Aerotransportado a ser implementado, existem algumas diferenças em relação ao conceito operacional descrito nas seções anteriores. É importante considerar estas diferenças ao interpretar os resultados da análise. As principais diferenças são que, na aplicação real:

- A operação ‘Intercalar’ descrita na subseção 5.3.1 também é utilizada, com rotas convergindo em um determinado ponto de rota;
- Nem todas as aeronaves estão equipadas para executar RNP-1; e
- Nem todas as aeronaves estão equipadas com os itens apresentados da Tabela 5-1.

Assume-se que as características acima serão próprias do conceito operacional de TBS a ser implementado na prática da Aviação Civil nos próximos anos.

5.7 Identificação dos Perigos e Tópicos de Segurança

A análise de risco desenvolvida nesta tese tem enfoque predominantemente quantitativo. Por isso é exigida a elaboração de um modelo matemático formal, o que está descrito no Capítulo 6. Espera-se que este modelo represente da forma mais realista possível o comportamento da aplicação real. Entretanto, o modelo precisa ser compreensível e tratável do ponto de vista computacional e, portanto, deve-se procurar limitar sua complexidade. Com o intuito de que o modelo não omita aspectos de grande relevância para o cálculo do risco de acidente, uma etapa qualitativa de análise de perigos foi efetuada.

No início da análise qualitativa de perigos procurou-se reunir resultados de algumas análises já realizadas por outros autores sobre a questão de Espaçamento Aerotransportado, apresentados a seguir.

5.7.1 Análise Operacional de Perigos

Esta análise foi desenvolvida na Atividade 3 do projeto CARE (*Cooperative Actions of Research and development in Eurocontrol*), e seguiu a metodologia do grupo de trabalho RTCA SC-189/EUROCAE WG-53, definida em (CARE, 2001). Esta metodologia denomina-se genericamente de OHA (*Operational Hazard Assessment*), e permite a identificação de perigos relacionados com as aplicações ASAS.

O propósito da OHA é desenvolver uma avaliação qualitativa completa de perigos potenciais que resultem de mau funcionamento ou falha de um componente (seja um artefato ou um ser humano) da aplicação selecionada. Baseada em uma descrição funcional completa dos procedimentos aéreos e de solo, a identificação dos perigos operacionais fica baseada em:

- Falhas funcionais de equipamentos;
- Falha humana para responder apropriadamente à falha funcional;
- Erro humano ou omissão durante uso normal do equipamento;
- Perigos decorrentes da transição para os novos procedimentos, na fase de estréia da nova aplicação; e
- Fatores externos que tenham influência na segurança.

A metodologia OHA trabalha com tabelas de níveis de severidade para cada perigo em potencial, de 1 (mais severo) a 5 (menos severo), para os quais são especificados os tipos de efeitos na aeronave, nos seus ocupantes, na tripulação e no serviço de tráfego aéreo. Também são utilizados níveis de classificação subjetiva de probabilidade de ocorrência de cada perigo. Estes, quando combinados com a severidade do perigo, definem se o perigo é aceitável ou não.

Alguns exemplos de perigos identificados na referência (CARE, 2002) são apresentados a seguir, na Tabela 5-2, para a operação ‘Intercalar’ do ASAS. Cada um dos perigos está acompanhado de um grau de severidade. Na análise OHA para a aplicação de espaçamento temporal aerotransportado apresentada em (CARE, 2002), os perigos foram identificados a

partir de uma detalhada descrição operacional, mas os níveis de probabilidade para cada perigo não chegaram a ser avaliados.

Tabela 5-2: Perigos identificados para a operação ‘Intercalar’ do ASAS (CARE, 2002)

Fase de Inicialização do Procedimento (P1)

Código	Título	Severidade
OH 1	Oportunidade de realizar o procedimento de seqüenciamento baseado em tempo foi perdida	5
OH 2	Inicialização do seqüenciamento baseado em tempo está atrasada	4
OH 3	Inicialização do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo não foi apropriada	4
OH 4	Falta de identificação da aeronave alvo durante a inicialização do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	4
OH 5	Identificação incorreta da aeronave alvo durante a inicialização do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	4

Fase de Execução do Procedimento (P2)

Código	Título	Severidade
OH 6	Identificação errônea da aeronave alvo durante o procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	2 a 3
OH 7	Perda de comunicação vocal com aeronaves executando o procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	3 a 4
OH 8	Execução inapropriada do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	4
OH 9	Espaçamento temporal aplicado incorretamente durante o procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	3 a 4
OH 10	Tempo errôneo aplicado para o espaçamento durante o procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	2 a 3
OH 11	Execução incorreta do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo interferindo com outro tráfego próximo	3
OH 12	Atraso na transferência entre setores de aeronaves envolvidas no procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	4
OH 13	Inabilidade parcial do ATCo de prover a separação entre aeronaves durante o procedimento de seqüenciamento baseado em tempo	2 a 3

Fase de Finalização do Procedimento (P3)

Código	Título	Severidade
OH 14	Finalização incorreta do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo (no limite da autorização)	4
OH 15	Interrupção anormal do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo pela tripulação (*) severidade dependendo do tempo de espaçamento aplicado	3 a 4 (*)
OH 16	Múltiplas interrupções do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo pela tripulação (*) severidade dependendo do número de procedimentos interrompidos simultaneamente e do espaçamento aplicado	2 a 3 (*)

Perigos Operacionais Diversos

Código	Título	Severidade
OH 17	Inabilidade parcial de restabelecer separação mínima do ATCo após o fim do procedimento de seqüenciamento baseado em tempo (*) severidade dependendo da habilidade do ATCo de restabelecer separação	2 a 3 (*)
OH 18	Perda ou atraso de comunicação vocal durante o final do procedimento	2 a 3

A análise OHA realizada para este procedimento, de acordo com a metodologia RTCA/EUROCAE, baseou-se na identificação de fatores influenciadores da segurança que podem ter impacto nos critérios de separação entre aeronaves. Esta identificação de fatores foi feita por meio da análise de cenários de falha operacional relacionadas às falhas em equipamentos ou erros de procedimento. Mesmo tendo como base uma descrição em alto nível, não exaustiva, das operações e funções ASAS, esta abordagem demonstrou-se demorada e impossibilitou a identificação de diversas causas de falhas.

De acordo com (CARE, 2002), a OHA foi ampliada e corrigida para suprir algumas necessidades identificadas: realizar um agrupamento efetivo de diversos cenários adversos para as aplicações ASAS, de forma a acelerar a análise de um grande número de cenários adversos e avaliar melhor o impacto de fatores humanos na segurança das operações ASAS. Estas deficiências foram em parte contornadas na análise da aplicação de espaçamento temporal por intermédio da busca dos fatores influenciadores de segurança, relatados em (CARE, 2002). Entretanto, nesta segunda aplicação da metodologia foi constatada a necessidade de haver avaliação quantitativa de perigos operacionais, desde os primeiros

estágios do processo de análise, pois a OHA não oferece meios de analisar consistentemente a probabilidade de ocorrência dos perigos e, por isso, fica difícil de avaliar quais os meios de mitigação mais indicados para serem aplicados. A escolha dos meios de mitigação a serem aplicados deve ser feita de tal forma que, caso um perigo tenha alta severidade, mas sua probabilidade de ocorrência é desprezível, o emprego de um meio de mitigação para este perigo não é prioritário; por outro lado, caso a probabilidade de ocorrência seja considerável, então se faz necessário estabelecer um meio de mitigação eficaz.

É importante notar que, mesmo com as melhorias realizadas sobre a OHA de (CARE, 2002), ela não possibilitou identificar nenhum perigo de severidade 1, conforme pode ser verificado na Tabela 5-2. Já o presente trabalho de investigação científica verificou, através de um modelo específico, a ocorrência de perigos com grau de severidade 1, conforme está relatado nos Capítulos 7 e 8.

No sentido de avaliar as probabilidades de ocorrência de perigos, a metodologia TOPAZ apresenta-se como sendo bastante útil, pois ela é quantitativa em seu núcleo e induz à modelagem formal do espaço de estados do sistema. Isto significa que o grande número de possíveis situações do sistema fica representado pelas combinações dos estados localizados dos diversos elementos constituintes do sistema. Tais elementos, quando representados matematicamente de forma adequada, funcionam como “bases geradoras” que produzem uma grande variedade de situações diferentes que podem ser simuladas por computador. Por outro lado, pelo fato de não utilizar análise “manual” de cadeias de eventos, evita que os analistas dêem atenção excessiva a determinados “ramos” da árvore de falha e, por consequência, omitam a análise de outros ramos de grande relevância para a segurança da aplicação.

5.7.2 COSPACE HAZOP

Uma análise semelhante à OHA foi realizada para a aplicação de espaçamento ASAS, utilizando a metodologia HAZOP (*HAzard and OPerability*) (COSPACE, 2006b). Esta metodologia consiste em uma abordagem de *brainstorm* estruturado, desenvolvida pela indústria química ICI na década de 70, mas tem sido empregada em muitas outras áreas, como recentemente no ATM. É freqüentemente usada nos estágios iniciais de projeto, e se baseia nas considerações de especialistas sobre erros potenciais relacionados à descrição do sistema e/ou de cenários específicos. A HAZOP busca determinar dois itens principais:

- Erros potenciais (incluindo suas consequências junto com a severidade estimada e a freqüência prevista, usualmente em termos qualitativos); e

- Soluções potenciais para estes erros, quando eles não são desprezíveis.

A HAZOP para as aplicações de Espaçamento Aerotransportado foi realizada como parte do projeto CoSpace do Eurocontrol. Esta HAZOP teve como objetivos específicos, com relação às aplicações de Espaçamento Aerotransportado:

- Identificar erros de operação;
- Fazer uma avaliação de suas causas, consequências e perigos resultantes, salvaguardas e severidades/probabilidades;
- Propor possíveis recomendações para consideração futura; e
- Alimentar o desenvolvimento do conceito operacional da aplicação com informação relacionadas com a segurança.

As características do ambiente operacional foram definidas e a HAZOP foi feita em duas partes separadas: uma para controladores e outra para pilotos. Posteriormente, a HAZOP de consolidação foi efetuada. O resultado de erros identificados é mostrado na Tabela 5-3. Os erros foram agrupados por categoria e, nas colunas da direita, estão associados um nível de severidade e o número de erros identificados em cada categoria. Nestes itens, pode haver duas ou mais linhas com números, e cada uma se refere a um erro distinto dentro da respectiva categoria.

Tabela 5-3: Lista de erros da HAZOP (COSPACE, 2006b).

Tarefa	Categoria de Erro	Seve- ridade	No. de Erros
Primeira chamada da aeronave na frequência do setor	A ligação de espaçamento na tela do controlador está inconsistente	3	1
Seleção do alvo	Seleciona-se aeronave errada	3	3
Identificação do alvo	Identifica-se a aeronave errada	3	3
Instrução de espaçamento	Instrução não é dada ou não é inserida pela tripulação no ASAS	3 3 a 4	1 4
	Apenas parte da instrução é dada ou não é inserida pela tripulação no ASAS	2 a 3 3 3 a 4	1 1 2
	Ponto de intercalação errado é dado ou inserido pela tripulação no ASAS	3	5
	Valor errado de espaçamento é dado ou inserido pela tripulação no ASAS	2 3	7 1
	Intercalação iniciada impropriamente ou não iniciada	3 3 a 4	1 3
	Espaçamento não é mantido ou mantido impropriamente	3	2
	Outra aeronave assume a instrução	2	1
Cancelamento do Espaçamento	Instrução não é dada ou não é inserida (ou parcialmente inserida) pela tripulação no ASAS	3 3 a 4	1 3
	Aeronave errada assume a instrução de cancelamento	3	1

Esta HAZOP também faz recomendações para aumentar a segurança da aplicação. A lista de recomendações é um pouco extensa e por isso não está incluída neste texto. Maiores detalhes sobre esta HAZOP podem ser encontrados em (COSPACE, 2006b).

A análise funcional de perigos para aplicações de Espaçamento Aerotransportado continua em andamento no projeto CoSpace, pretendendo-se utilizar os erros identificados pela HAZOP para elaborar uma árvore de eventos e uma análise de árvore de falhas.

Apesar de não cobrir todas as situações, acredita-se que esta HAZOP tenha coberto os principais aspectos relacionados com as aplicações de Espaçamento Aerotransportado, ao menos em situações nominais (uma situação é dita nominal quando todos os equipamentos estão funcionando conforme as respectivas especificações, e os fatores ambientais têm um comportamento considerado normal). Por outro lado, não estão cobertos aspectos anormais como situação meteorológica adversa, aeronaves com equipamentos heterogêneos, órbitas de espera, aproximações perdidas, falhas no rádio, etc. Para investigar estes problemas, simulações em pequena escala estão sendo realizadas como continuação do projeto CoSpace. Tais simulações têm o intuito de analisar:

- O uso de uma terceira rota de entrada na intercalação em um mesmo fixo;
- A presença de vento forte paralelo e perpendicular aos segmentos de intercalação; e
- A presença de aeronaves não equipadas com ASAS na operação de seqüenciamento.

Alguns resultados destas simulações podem ser encontrados em (BOURSIER et al., 2006a, 2006b).

5.7.3 Fase Qualitativa da Metodologia TOPAZ

A metodologia TOPAZ prevê uma fase qualitativa de análise de perigos para servir de orientação à elaboração do modelo matemático. Esta fase qualitativa visa identificar todos os perigos relevantes que afetam a aplicação sob análise, sendo feita com o uso de *brainstorm* envolvendo especialistas, com auxílio do banco de dados de perigos mantido pelo NLR (*National Aerospace Laboratory*, Países Baixos).

Foi iniciado um estudo de identificação e agrupamento de perigos para a aplicação de Espaçamento Aerotransportado, em estudo nesta tese, dentro da metodologia TOPAZ. Este estudo está relatado no documento (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006). Entretanto, pela impossibilidade de organizar sessões de especialistas dentro das limitações de recursos deste

projeto acadêmico de pesquisa, e pela grande multiplicidade das situações de perigo, que foi percebida na fase inicial da análise qualitativa, decidiu-se passar para a elaboração do modelo matemático, antes de concluir a análise qualitativa. Desta forma, procurou-se elaborar o modelo matemático utilizando-se a experiência de muitos elementos semelhantes em modelos já desenvolvidas com a metodologia TOPAZ por especialistas do NLR.

5.8 Considerações Finais do Capítulo

As operações ‘Intercalar’ e ‘Permanecer em Trilha’ ASAS, descritas neste capítulo, estão de acordo com importantes referências no desenvolvimento de novos sistemas de ATM, como o Centro Experimental do Eurocontrol e o Grupo de Foco em Requisitos (RFG – *Requirement Focus Group*, composto de membros de diversos institutos, agências e corporações, em âmbito internacional; vide (RFG, 2005)), e oferecem um grande potencial de melhoria da eficiência no tráfego aéreo. Ambas as operações possuem características muito semelhantes, o que faz com que a análise de uma delas permite chegar a conclusões muito similares às da análise da outra. Apesar de terem sido realizados estudos qualitativos de identificação de perigos, ainda não se conhece a fundo o impacto no nível de segurança que essas novas operações causam nas operações de tráfego aéreo nas áreas terminais. Para que estas operações possam ser praticadas com segurança, é preciso avaliar o risco de colisão que está relacionado com elas e, se possível, fazer ajustes e definir requisitos para que sejam praticadas de forma segura. Este é o foco do próximo capítulo e a principal contribuição desta tese.

6 Modelo Formal da Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado

Dada a necessidade de se fazer a análise quantitativa de risco da operação ‘Permanecer em Trilha’, utilizando ASAS com critério de espaçamento temporal, cujo modelo funcional foi apresentado no Capítulo 5, este capítulo apresenta um modelo formal para este procedimento, que é utilizado para o cálculo da probabilidade de colisão entre aeronaves.

A metodologia TOPAZ, adotada neste trabalho de pesquisa para a análise de risco de aplicações de Espaçamento Temporal Aerotransportado, tem enfoque quantitativo, e requer a elaboração de um modelo matemático formal para estas aplicações. Tal modelo é descrito nas seções que seguem neste capítulo.

6.1 Introdução à Modelagem Formal da Aplicação por meio de Redes de Petri

Esta fase da análise consiste em modelar matematicamente a operação de tráfego aéreo, como um sistema híbrido, cujo comportamento é regido por variáveis discretas e variáveis contínuas (OLIVEIRA, 2003). Para que a modelagem feita neste trabalho de pesquisa seja mais bem compreendida, esta seção apresenta uma breve introdução a respeito do formalismo das Redes de Petri.

Conforme já foi mencionado na seção 4.2, os problemas de segurança do tráfego aéreo surgem principalmente por sua natureza sistêmica, de forma que é preciso que ocorra uma combinação de falhas em diversos elementos para que aconteça um acidente, envolvendo elementos de hardware, de software e os operadores humanos. O formalismo das Redes de Petri possibilita modelar, em uma só linguagem, o comportamento de todos estes tipos de elementos.

6.1.1 Rede de Petri Básica

Para se definir uma rede de Petri, é preciso utilizar o conceito de grafo. Um grafo é um par $(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ formado pelo conjunto de nós $\mathcal{V}$, e pelo conjunto de arcos $\mathcal{E}$, sendo que cada arco E_i pertencente a $\mathcal{E}$ tem uma extremidade em um nó V_i e outra extremidade em um nó V_j , ambos

pertencentes a $\mathcal{V}$. A Fig. 6-1 apresenta um exemplo simples de grafo, contendo três nós e três arcos.

Fig. 6-1: Exemplo de grafo simples.

Um grafo é dito bipartite quando o conjunto de nós $\mathcal{V}$ é a união dos conjuntos mutuamente excludentes $\mathcal{P}$ e $\mathcal{T}$ tais que toda aresta em $\mathcal{E}$ tem uma extremidade em um nó de $\mathcal{P}$ e outra extremidade em um nó de $\mathcal{T}$, conforme ilustrado na Fig. 6-2.

Fig. 6-2: Exemplo de grafo bipartite.

Uma rede de Petri básica, determinada pelos conjuntos $(\mathcal{P}, \mathcal{T}, \mathcal{E})$ é um grafo bipartite com dois tipos de nós: *lugares* e *transições*, que formam respectivamente conjuntos mutuamente excludentes: $\mathcal{P}$ para os lugares, e $\mathcal{T}$ para as transições. As transições são representadas por retângulos e geralmente modelam ações, enquanto que os lugares são representados por círculos vazios, e geralmente constituem pré ou pós-condições para estas ações. Uma ficha, representada por um pequeno círculo preto, ao residir em um lugar, modela uma pré-condição presente. Em geral, múltiplas fichas são permitidas em uma rede de Petri, mesmo dentro do mesmo lugar, de tal forma que pré-condições compostas podem ser modeladas sem aumento explosivo do tamanho da rede de Petri. As fichas determinam o estado dinâmico da rede de Petri. A Fig. 6-3 ilustra uma rede de Petri simples, modelando o funcionamento de um motor genérico.

Para uma dada transição T_i , os lugares de entrada desta transição são lugares conectados a esta transição por um arco com origem em um destes lugares e término em T_i . Por exemplo, T_1

tem como lugares de entrada P_1 e P_3 . Por outro lado, para uma dada transição T_i , os lugares de saída desta transição são lugares conectados a esta transição por um arco com origem em T_i e término em um destes lugares. Por exemplo, T_1 tem como lugar de saída P_2 .

Fig. 6-3: Elementos básicos de uma rede de Petri e um exemplo simples que representa o funcionamento de um motor.

Em sua forma mais simples, a execução de uma rede de Petri básica se dá em passos de tempo discretos $(t_i, t_{i+1}, \dots, t_n)$, e ocorre da seguinte maneira: uma transição é dita *habilitada* no instante t_i se cada um dos lugares de entrada contém ao menos uma ficha. Quando isso ocorre, a transição *dispara*: no instante t_{i+1} ela terá removido as fichas de seus lugares de entrada e produzido fichas para os seus lugares de saída. No exemplo da Fig. 6-3, a transição T_1 está habilitada, pois todos seus lugares de entrada contém uma ficha. O disparo de T_1 , que está na iminência de acontecer, produzirá uma ficha em P_2 . Nota-se que T_2 estará habilitada somente quando houver uma ficha em P_4 .

A dinâmica da rede de Petri da Fig. 6-3 representa os modos de funcionamento de um motor: inicialmente temos o *Motor parado* (ficha em P_1) e, para iniciar seu funcionamento, um operador ativou um dispositivo de partida para que se tenha a *Partida acionada* (ficha em P_3) no sistema. Esta combinação de condições dispara a ação *Liga* (transição T_1), que faz com que o motor inicie seu funcionamento e, desta forma, tenha-se o *Motor girando*. Caso haja *Falta de combustível* (ficha em P_4), com *Motor Girando* (ficha em P_2). Esta combinação de condições dispara a ação *Desliga* (transição T_2), e assim o sistema volta à condição *Motor parado*.

Além desses elementos básicos definidos, a modelagem de processos físicos requer um comportamento temporal mais refinado no disparo das transições. Por isso a próxima seção apresenta as Redes de Petri de Tempo.

6.1.2 Rede de Petri de Tempo

Conceitualmente, a definição que segue está baseada em Peterson (1981) e Leveson e Stolzy (1987). Uma rede de Petri de tempo possui, além dos elementos $(\mathcal{P}, \mathcal{T}, \mathcal{E})$ próprios de uma rede de Petri básica, uma função de entrada $\mathcal{F}_i$, uma função de saída $\mathcal{F}_o$ e uma marcação inicial $\mathcal{I}$. A função de entrada $\mathcal{F}_i$ mapeia cada transição T_k em um conjunto de lugares de entrada $\mathcal{F}_i(T_k)$. Similarmente, a função de saída mapeia cada transição T_k em um conjunto de lugares de saída $\mathcal{F}_o(T_k)$. A presença ou a ausência inicial de fichas nos diversos lugares é determinada pela marcação inicial $\mathcal{I}$. Por fim, para modelar o tempo, são introduzidas as funções de temporização de disparo Min e Max. Estas funções especificam as condições temporais sob as quais uma transição pode disparar, mapeando uma dada transição T_k em um valor no conjunto $\mathbb{R}^+$ dos números reais não negativos, e são tais que $\text{Min}(T_k) \leq \text{Max}(T_k)$.

Em uma rede de Petri de tempo, seja $\tau_{0,k}$ o instante inicial em que a transição T_k passou a estar habilitada. T_k é disparável no instante τ se e somente se ela foi continuamente habilitada durante o intervalo $[\tau_{0,k} + \text{Min}(T_k), \tau]$. Uma transição disparável *pode* disparar em qualquer instante τ pertencente ao intervalo $[\tau_{0,k} + \text{Min}(T_k), \tau_{0,k} + \text{Max}(T_k)]$. Uma transição *deve* disparar caso ela tenha permanecido continuamente habilitada no intervalo $[\tau_{0,k}, \tau_{0,k} + \text{Max}(T_k)]$. A Fig. 6-4 ilustra, entre os instantes $\tau_{0,k}$ e τ , os intervalos de tempo em que uma transição *Não pode* e *Pode* disparar, e o instante em que ela *Deve* disparar.

Fig. 6-4: Regras para disparo em uma transição continuamente habilitada a partir do instante $\tau_{0,k}$.

Seja τ o instante presente e $\delta_{E,k}$ o tempo restante de habilitação da transição T_k , tais que:

$$\delta_{E,k} = \begin{cases} \infty & \text{se } T_k \text{ não está habilitada} \\ \tau_{0,k} + \text{Max}(T_k) - \tau & \text{se } T_k \text{ está habilitada desde o instante } \tau_{0,k} \end{cases} \quad (6-1)$$

Define-se o estado $\xi(\tau)$ da rede de Petri de tempo como uma tupla (μ, Δ_E) , onde μ é um vetor de marcação que define a presença ou ausência de fichas em cada lugar da rede, e Δ_E é o vetor $(\delta_{E,k})_{k=1}^{N_T}$, sendo N_T o número de transições da rede.

Estas definições conceituais podem ser mais bem compreendidas analisando o exemplo de uma rede de Petri que modela um controle de intersecção rodo-ferroviária em nível, ilustrado na Fig. 6-5, cuja rede de Petri está graficamente representada, em diferentes instantes do tempo, nas figuras 6-6 e 6-7. A rede destas figuras está organizada em três áreas distintas: a área do TREM, a área do COMPUTADOR DE CONTROLE e área da CANCELA. Na Fig. 6-6, referente a $\tau = 0$, observa-se a marcação inicial $\mathcal{I}$, com o número 1 indicando uma ficha nos lugares P_1 e P_6 . As funções Max e Min determinam os intervalos de tempo válidos para o trem passar pelos trechos considerados da via (lugares P_1 a P_4), o que, em um sistema real, dependeria das velocidades máxima e mínima do trem e, no caso do lugar P_3 , também depende do comprimento do trem. Para as transições que não têm ligação com os lugares P_1 a P_4 , os tempos das funções de temporização Min e Max são nulos, o que significa que são transições imediatas. Os lugares e as transições da rede podem ou não ter apelidos associados, indicados em fonte itálica, como nos casos de P_1 a P_4 e também P_{11} e P_{12} , o que facilita a compreensão da lógica de modelagem.

Fig. 6-5: Ilustração de um sistema de intersecção rodo-ferroviária em nível.

A lógica de execução da rede apresentada na Fig. 6-6 é a seguinte. O trem inicialmente encontra-se no trecho *Distante* [P_1], o qual percorre num tempo entre 5 e 10 unidades de tempo. No instante em que o trem está na fronteira com o trecho de *Aproximação* [P_2], a transição T_1 dispara, consumindo a ficha em *Distante* [P_1] e produzindo, simultaneamente, uma ficha em *Aproximação* [P_2] e outra em P_5 , resultando no estado da Fig. 6-7.

A marcação de fichas exibida na Fig. 6-7, no entanto, é instantânea, pois imediatamente após T_1 disparar, T_4 dispara, antes que haja qualquer alteração em $\delta_{E,2}$ (sem que transcorra nenhuma fração de tempo na rede), pois ela é habilitada pela presença das fichas em ambos os lugares de entrada P_5 e P_6 . Estas fichas são então consumidas por T_4 que, por sua vez, produz ao mesmo tempo uma ficha em P_7 e outra em P_9 . Além disso, continuando a seqüência de disparos instantâneos, T_7 é habilitada e dispara, consumindo a ficha do lugar *Aberta* [P_{11}] e do lugar P_9 , produzindo uma ficha no lugar *Fechada* [P_{12}] da cancela. Estes lugares se referem, respectivamente, às posições físicas aberta e fechada da cancela. A rede de Petri permanece com esta marcação até que a próxima transição ocorra.

Fig. 6-6: Uma rede de Petri representando um controle de intersecção rodo-ferroviária em nível, no estado inicial.

Quando o trem atinge a fronteira do trecho de cruzamento (de acordo com algum intervalo de duração entre $\text{Min}(T_2)$ e $\text{Max}(T_2)$), a transição T_2 , que já estava habilitada, então dispara, retirando a ficha de *Aproximação* [P_2] e produzindo uma ficha em *Cruzamento* [P_3]. O trem então leva algum intervalo de duração entre $\text{Min}(T_3)$ e $\text{Max}(T_3)$ para percorrer e desocupar o trecho de cruzamento. Feito isso, a transição T_3 dispara, consumindo a ficha de *Cruzamento*, e produzindo uma ficha em *Afastamento* [P_4] e outra em P_8 . Isto faz com que a transição T_5 dispare, consumindo as fichas de P_7 e P_8 , e produzindo uma ficha em P_{10} . Esta, juntamente com a ficha que já estava presente no lugar *Fechada*, habilita e provoca o disparo da transição T_6 que, por sua vez, consome as fichas de P_{10} e P_{12} , e produz uma nova ficha no lugar *Aberta*. A rede então vai para um estado final que se distingue do inicial apenas pelo fato de que não existe mais uma ficha no lugar *Distante* [P_1], mas sim no lugar *Afastamento* [P_4].

$$\delta_{E,1} = \infty, \delta_{E,2} = 5, \delta_{E,3} \dots \delta_{E,7} = \infty$$

$$\mu = \{0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0\}$$

Fig. 6-7: Uma rede de Petri representando um controle de intersecção rodo-ferroviária em nível, no estado em que o trem está na região de *Aproximação*.

Pelo exemplo da Fig. 6-6 e Fig. 6-7, é possível observar o grande potencial de modelagem das redes de Petri de tempo. Entretanto, também é possível notar que os instantes exatos de disparo das transições dependentes das funções de temporização Min e Max, quando os valores destas não são nulos, não estão consistentemente definidos dentro da rede. Da maneira como o exemplo foi apresentado, estes instantes dependem de eventos exógenos à rede,

remetendo ao processo de deslocamento do trem ao longo dos trechos da via. Contudo, é necessário ainda fazer com que este processo externo seja formalmente definido dentro da rede, para que todas as propriedades de execução dinâmica da rede sejam passíveis de manipulação matemática.

Por outro lado, observa-se que os elementos do processo de execução dinâmica da rede, deixados como exógenos e omitidos na definição da rede de Petri de tempo, podem ser de duas naturezas distintas, uma determinística, e outra estocástica. Os elementos de natureza determinística são comportamentos de processos físicos ou lógicos que podem ser deterministicamente modelados, como a potência gerada pelo motor do trem dado um determinado comando do operador, ou a velocidade de fechamento da cancela uma vez que o dispositivo de fechamento foi acionado. Os elementos de natureza estocástica estão associados a comportamentos cujas dinâmicas não permitem uma previsão exata de seus estados futuros, dadas as condições conhecidas presentes. Exemplos de comportamentos estocásticos são falhas no dispositivo de acionamento da cancela, ou a presença de automóveis sobre os trilhos no momento em que a cancela se fecha.

Existem diversas definições de redes de Petri, disponíveis na literatura especializada, que suprem necessidades de modelar comportamentos determinísticos e estocásticos diversos, conforme pode ser encontrado em (MURATA, 1989; MACIEL, LINS, CUNHA, 1996; GERMAN, 2000; EVERDIJ, BLOM, 2003). Para a modelagem da operação ‘Permanecer em Trilha’ do ASAS, foi escolhido o formalismo denominado Rede de Petri Estocástica e Dinamicamente Colorida (SDCPN – *Stochastically and Dynamically Coloured Petri Net*), conforme Everdij e Blom (2003). Esta escolha foi feita pelo fato de tal formalismo já ter sido utilizado com sucesso em outras aplicações relacionadas com o gerenciamento de tráfego aéreo (BLOM et al., 2001; BLOM et al., 2005). Entretanto, antes de apresentar o formalismo da SDCPN, o que está feito na seção 6.2, dois elementos adicionais para as redes de Petri são introduzidos: os arcos habilitadores e os arcos inibidores.

6.1.3 Arcos Habilitadores e Arcos Inibidores

Os arcos habilitadores e os arcos inibidores são elementos que permitem diminuir a complexidade da rede de Petri, evitando o uso de lugares e transições auxiliares. Os arcos apresentados nas seções anteriores são doravante chamados arcos ordinários. Um arco habilitador A_E tem sempre origem em um lugar P_i e término em uma transição T_j , não podendo ser empregado na orientação oposta. O arco habilitador funciona de forma similar a

um arco ordinário de entrada à transição T_j , com exceção para o fato de que T_j não pode consumir a ficha presente no lugar de origem do arco A_E . De forma semelhante, um arco inibidor A_I tem origem em um local P_k e término em uma transição T_l . Contudo, a transição T_l somente pode disparar se não houver nenhuma ficha em P_k . O emprego destes tipos de arcos pode ficar mais claro por meio da Fig. 6-8.

Nesta figura, a presença da ficha no lugar *Aproximação* [P_2], combinada com a presença da ficha no lugar *Aberta* [P_{11}], habilita o disparo da transição T_7 . Entretanto, a ficha em *Aproximação* não é consumida, pois o arco que vai de *Aproximação* [P_2] a T_7 é habilitador. Quando uma ficha passa a estar presente em *Fechada* [P_{12}], a transição T_6 fica inibida enquanto houver fichas em *Aproximação* [P_2] e *Cruzamento* [P_3], por causa dos arcos inibidores que têm origem nestes lugares e terminam em T_6 .

Comparando a Fig. 6-8 com a Fig. 6-6, é possível observar que o uso dos arcos habilitadores e inibidores possibilitaram eliminar o uso de todos os nós e arcos da área denominada COMPUTADOR DE CONTROLE, sem modificar o comportamento da cancela em relação ao processo de passagem do trem, representada pelos elementos da área denominada TREM. Dessa forma foi possível diminuir a complexidade do modelo.

Fig. 6-8: Emprego dos arcos habilitadores e inibidores na rede de Petri do controle de intersecção rodo-ferroviária em nível.

6.2 Descrição do Modelo em Rede de Petri Estocástica e Dinamicamente Colorida (SDCPN)

A metodologia TOPAZ utiliza como linguagem de representação matemática as Redes de Petri Estocástica e Dinamicamente Coloridas (SDCPN – *Stochastically and Dynamically Coloured Petri Nets*). Este formalismo é bastante adequado para modelar sistemas híbridos, como aplicações de ATM, pois permitem modelar processos de Markov de estados híbridos. Os processos de Markov são processos estocásticos cujos estados futuros dependem apenas do estado presente; a característica de estados híbridos decorre da presença de elementos de comportamento discreto e elementos de comportamento contínuo (OLIVEIRA, 2003). O uso das SDCPNs permite também fazer a especificação funcional de processos complexos de estados finitos e a aplicação de ferramentas de análise estocástica. Além disso, sua linguagem permite a modelagem de movimento Browniano (EVERDIJ, BLOM, 2003). Este tipo de movimento ocorre com as massas de ar na atmosfera e também nos ruídos espúrios nos instrumentos de medida, fenômenos que podem ser relevantes para as aplicações de ATM.

O termo movimento Browniano pode se referir aos seguintes conceitos:

- (a) O fenômeno físico em que as partículas, imersas num fluido ou flutuando em sua superfície, movem-se aleatoriamente; ou
- (b) O modelo matemático usado para descrever tais movimentos, também conhecido como processo de Wiener, cuja definição é a seguinte: um processo de Wiener $W(t)$ é um processo estocástico de tempo contínuo ($t \geq 0$), para o qual $W(0) = 0$ e o incremento $W(t) - W(s)$ é Gaussiano com média 0 e variância $(t - s)$ para qualquer $0 \leq s \leq t$, e os incrementos para intervalos de tempo sem intersecção mútua são independentes.

A linguagem matemática que permite modelar estes fenômenos, junto à dinâmica das redes de Petri apresentadas nas seções anteriores, é definida na seção 6.2.1. O significado de cada um dos elementos pode ser mais bem compreendido por meio do exemplo de aplicação apresentado na seção 6.2.2.

6.2.1 Definição de SDCPN

Uma SDCPN é, de acordo com Everdij e Blom (2004), definida pela seguinte 11-tupla:

$$\text{SDCPN} = (\mathcal{P}, \mathcal{S}, \mathcal{C}, \mathcal{T}, \mathcal{A}, \mathcal{N}, \mathcal{V}, \mathcal{G}, \mathcal{D}, \mathcal{F}, \mathcal{I})$$

onde:

- $\mathcal{P}$ – é uma lista de lugares;
- $\mathcal{S}$ – é um conjunto de tipos de cores para as fichas que ocorrem na rede;
- $\mathcal{C}$ – é uma função-cor que mapeia cada local a um tipo de cor em $\mathcal{S}$;
- $\mathcal{T}$ – é um conjunto de transições, que consiste na união de três conjuntos:
 - Um conjunto de transições de guarda ($\mathcal{T}_G$), que são transições cujo disparo é condicionado às cores das fichas nos lugares de entrada destas transições;
 - Um conjunto de transições de atraso ($\mathcal{T}_D$), que são transições que, uma vez habilitadas, demoram um intervalo de tempo para disparar, sendo que este intervalo segue uma distribuição probabilística do tipo exponencial;
 - Um conjunto de transições imediatas ($\mathcal{T}_I$), cujo comportamento é idêntico às transições das redes de Petri básicas, apresentadas na seção 6.1.1;
- $\mathcal{A}$ – é um conjunto de arcos, que consiste em um conjunto de arcos ordinários ($\mathcal{A}_O$), um conjunto de arcos habilitadores ($\mathcal{A}_E$) e um conjunto de arcos inibidores ($\mathcal{A}_I$);
- $\mathcal{N}$ – é uma função de nó, que mapeia cada arco a um par ordenado de uma transição e um local (múltiplos arcos entre o mesmo local e a mesma transição são permitidos);
- $\mathcal{V}$ – é um conjunto de funções de cor de ficha específicas por local, que descrevem o que acontece à cor de uma ficha enquanto ela reside em um local;
- $\mathcal{G}$ – é um conjunto de guardas de valores Booleanos associadas a cada transição em $\mathcal{T}_G$ com uma função guarda;
- $\mathcal{D}$ – é um conjunto de atrasos de transição associando cada transição em $\mathcal{T}_D$ a uma função de atraso;
- $\mathcal{F}$ – é um conjunto de funções probabilísticas de disparo, que para cada transição descreve a quantidade e as cores das fichas produzidas pela transição em seu disparo;
- e
- $\mathcal{I}$ – é uma marcação inicial, que define o conjunto de fichas inicialmente presente, i.e., especifica em que locais elas inicialmente residem e as cores que estas fichas possuem inicialmente.

A Fig. 6-9 apresenta a representação gráfica dos elementos de uma SDCPN e uma pequena rede ilustrando o uso desses elementos.

Fig. 6-9: Elementos de uma SDCPN.

Não faz parte do foco desta tese apresentar em detalhe o significado de cada um dos elementos da definição formal de uma SDCPN. Contudo, será apresentado um exemplo do uso deste formalismo em uma aplicação simples de gerenciamento de tráfego aéreo.

6.2.2 Introdução ao Uso de uma SDCPN em uma Aplicação de Gerenciamento de Tráfego Aéreo

Esta seção apresenta uma representação simplificada da evolução da trajetória de uma aeronave em um setor do espaço aéreo, conforme apresentado por Everdij e Blom (2004), para propósitos didáticos.

Assume-se que existe um pequeno desvio da aeronave em relação à trajetória pretendida, e que esse desvio depende do correto funcionamento de dois sistemas da aeronave: o Sistema de Motor e o Sistema de Navegação (vide Fig. 6-10). Cada um destes sistemas pode estar em um dos dois possíveis modos: *Funcionando* (funcionando apropriadamente), ou *Não funcionando* (operando em algum modo de falha). Ambos os sistemas mudam de estado independentemente e seguindo tempos aleatórios de distribuição exponencial. A razão da escolha desta distribuição é que o valor de tempo resultante não depende do tempo já transcorrido, ou seja, $P(T > t + t_0 | T > t_0) = P(T > t)$. Dessa forma, é possível garantir que o processo estocástico gerado pelo modelo é um processo de Markov. As taxas de ocorrência das distribuições exponenciais aqui aplicadas são λ_3 (para reparo do sistema de motor), λ_4 (para falha do sistema de motor), λ_5 (para reparo do sistema de navegação) e λ_6 (para falha do sistema de navegação).

O estado de funcionamento destes sistemas tem o seguinte efeito na trajetória da aeronave: se ambos os sistemas estão *Funcionando*, o modo de Evolução da Aeronave é dito *Nominal* (vide Fig. 6-10) e a razão de alteração da posição e da velocidade da aeronave é dada pela

função $\mathcal{V}_1$ (i.e., se z_t é um vetor contendo esta posição e esta velocidade, então $\dot{z}_t = \mathcal{V}_1(z_t)$), que rege um desvio pequeno em relação à trajetória ideal. Por outro lado, se um ou ambos os sistemas estão no modo *Não funcionando*, a Evolução da Aeronave é dita *Não nominal*, e a razão de mudança da posição e da velocidade da aeronave é dada por $\mathcal{V}_2$, função que rege um desvio considerável da aeronave em relação à trajetória ideal. Quando a Evolução da Aeronave tem a ficha no lugar *Não nominal*, uma ficha passará a estar presente no lugar *Nominal* somente se ambos os sistemas, Sistema de Motor e Sistema de Navegação, tiverem ficha novamente no lugar *Funcionando*. Inicialmente, a aeronave tem uma dada posição x_0 e uma velocidade v_0 , e ambos seus sistemas estão no modo *Funcionando*. Este processo transcorre até que a posição da aeronave cruze a fronteira do setor de espaço aéreo considerado. Esta fronteira é representada pelo símbolo composto ∂G (o símbolo ∂ é comumente usado para representar a fronteira de um conjunto, no caso o conjunto G). Na rede de Petri da Fig. 6-10, o atingimento desta fronteira dispara uma das transições de guarda T_7 ou T_8 , e o modo de Evolução da Aeronave vai para *Fora do setor*.

Fig. 6-10: Redes de Petri Locais para o exemplo de operação aeronáutica.

Para facilitar a construção da SDCPN que modela esta aplicação, foram identificadas três entidades distintas, já citadas, dentro da rede: Evolução da Aeronave, Sistema de Navegação e Sistema de Motor. Estas entidades são classificadas como Redes de Petri Locais (LPN – *Local Petri Net*), dentro da abordagem modular de Everdij e Blom (2004).

As interações entre o Sistema de Navegação, o Sistema de Motor e a Evolução da Aeronave são modeladas ligando-se estas LPNs com arcos adicionais. Neste exemplo, evita-se remover fichas de uma LPN por causa de transições em outra LPN, por meio da utilização de arcos

habilitadores para as interações. A rede resultante é apresentada na Fig. 6-11. Nota-se que a transição T_1 é substituída pelas transições T_{1a} e T_{1b} . Assume-se neste modelo que as probabilidades de haver disparo simultâneo de T_3 e T_5 , ou disparo simultâneo de T_4 e T_6 , são nulas.

Fig. 6-11: Rede de Petri composta para o exemplo de operação aeronáutica.

A representação gráfica da Fig. 6-11 define de forma completa os elementos $\mathcal{P}$, $\mathcal{T}$, $\mathcal{A}$ e $\mathcal{N}$, da SDCPN, onde $\mathcal{T}_G = \{T_7, T_8\}$, $\mathcal{T}_D = \{T_3, T_4, T_5, T_6\}$ e $\mathcal{T}_I = \{T_{1a}, T_{1b}, T_2\}$. Os outros elementos da SDCPN são especificados abaixo:

$\mathcal{S}$: Um tipo de cor é definido, com $\mathcal{S} = \{\mathbb{R}^6\}$.

$\mathcal{C}$: $\mathcal{C}(P_1) = \mathcal{C}(P_2) = \mathcal{C}(P_7) = \mathbb{R}^6$. As três primeiras componentes da cor modelam a posição longitudinal, lateral e vertical da aeronave, e as três últimas componentes modelam as velocidades correspondentes. Para os lugares P_3 a P_6 , nenhum tipo de cor precisa ser definido.

$\mathcal{I}$: O lugar P_1 inicialmente tem uma ficha com cor $z_0 = (x_0, v_0)' \in \mathbb{R}^6$. Cada um dos lugares P_4 e P_6 têm inicialmente uma ficha sem cor.

$\mathcal{V}$: As funções de cor de ficha para os lugares P_1 , P_2 , e P_7 são definidas como $\mathcal{V}_{P_1} = \mathcal{V}_1$, $\mathcal{V}_{P_2} = \mathcal{V}_2$ e $\mathcal{V}_{P_7} = 0$. Para os lugares P_3 a P_6 a função de cor de ficha não está definida.

$\mathcal{G}$: As transições T_7 e T_8 têm uma guarda que é definida como $\partial G_{T_7} = \partial G_{T_8} = \partial G \times \mathbb{R}^3$.

$\mathcal{D}$: As taxas de salto para as transições T_3 , T_4 , T_5 e T_6 são respectivamente $\lambda_{T_3}(\cdot) = \lambda_3$, $\lambda_{T_4}(\cdot) = \lambda_4$, $\lambda_{T_5}(\cdot) = \lambda_5$ e $\lambda_{T_6}(\cdot) = \lambda_6$, respectivamente. A notação $\lambda(\cdot)$ indica que a taxa de falha λ pode variar em função de uma variável. Entretanto, neste exemplo as taxas de falha são constantes.

$\mathcal{F}$: Cada transição tem um único lugar de saída, para o qual ela dispara uma ficha com cor (se aplicável) igual à cor da ficha removida.

Este exemplo mostra como são construídos os elementos de uma SDCPN em uma aplicação de ATM que possui somente componentes técnicos. Entretanto, a elaboração do modelo em SDCPN para uma aplicação real de ATM envolve componentes humanos e componentes técnicos. Pelo fato de o comportamento do operador humano estar sob influência de fatores subjetivos, é importante encontrar maneiras de modelar estes fatores de forma objetiva, para que possam ser inseridos na análise de risco, que é eminentemente objetiva.

6.2.3 Modelagem de Fatores Humanos

Um tópico crucial em análise de segurança ATM é como os fatores humanos são incorporados no modelo de operação. É possível observar que vários dos perigos apresentados na Tabela 5-2 são influenciados por fatores humanos. Também se observa a necessidade de realizar uma abordagem que permita identificar e entender os perigos operacionais decorrentes da execução de tarefas dos operadores humanos envolvidos. Isto significa que modelos apropriados do desempenho humano são requeridos, de forma a descrever os princípios de cognição e responsabilidade, desde o entendimento geral básico de cada operação, até a determinação de seu peso no risco de acidente.

Blom, Daams e Nijhuis (2001) argumentam que a visão da confiabilidade humana deixou de ter uma abordagem exclusivamente centrada no erro, na qual a não-confiabilidade (*unreliability*) é modelada como a ocorrência de falhas no processamento humano de informações. O conceito de confiabilidade humana passou a ter uma perspectiva contextual, na qual as ações humanas são o produto dos estados internos e estratégias do ser humano, e o

ambiente no qual ele está. Por isso, para uma descrição apropriada da confiabilidade humana, é necessário incluir o processo cognitivo que sustenta as ações do operador humano (ATCo ou Piloto). Como resultado, obtém-se um modelo compreensivo do operador desempenhando sua tarefa.

Os principais benefícios esperados dos modelos conceituais para análise de segurança advêm do fato de que eles provêm retorno construtivo aos projetistas e eximem da necessidade de se utilizar modelos superestimados de tendência conservadora sobre as ações do operador, que podem prejudicar a compreensão de como a segurança é obtida na aviação.

6.2.3.1 Modelagem do Comportamento do Operador Humano

A modelagem do comportamento do operador humano é feita aqui de acordo com Blom, Daams e Nijhuis (2001) e Bakker et al. (2005). Na primeira referência, são utilizados alguns modelos psicológicos para desenvolver um modelo matemático para o ATCo executando seu trabalho, e na segunda, o modelo é estendido para os pilotos. O modelo tem foco nos seguintes aspectos de interação entre o Controlador e o processo de ATM:

1. Manutenção da consciência da situação;
2. Iniciação de ações críticas em tempo hábil;
3. Efetividade das ações críticas;
4. Ocorrência de situações perigosas que envolvam o controlador.

A elaboração do modelo compreende as seguintes etapas. Primeiro, a tarefa do Controlador Tático é descrita em termos de um conjunto adequado de subtarefas. Em seguida, o desempenho das subtarefas identificadas é relacionado ao contexto em que elas são executadas. Depois, os passos necessários para a execução de cada subtarefa são definidos com a participação de especialistas, e deve ser explicado como erros podem ocorrer em cada um destes passos. Tudo isso tem a finalidade de se obter um modelo matemático descrito na forma de rede de Petri.

A descrição detalhada dos princípios de modelagem do comportamento dos operadores humanos está presente no Apêndice P de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006), e os detalhes para a formalização na SDCPN nos Apêndices I, J e K do mesmo documento.

6.3 Especificação da SDCPN Para a Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado

Um modelo em SDCPN foi desenvolvido para representar as operações de espaçamento temporal aerotransportado, e a descrição deste modelo será apresentada nesta seção. Esta descrição não é exaustiva, mas tem apenas o intuito de proporcionar uma visão geral do modelo. A especificação completa do modelo está em (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006). Esta especificação foi feita com base na estrutura da especificação de Bakker et al. (2005), mas foi elaborada com uma significativa contribuição do autor do presente trabalho de pesquisa, tornando a nova especificação consideravelmente diferente da anterior. Para simplificar o texto, o termo *Espaçamento ASAS*, deste ponto em diante, é equivalente a *Espaçamento Temporal Aerotransportado*.

6.3.1 Modelo de Agentes

Para que o modelo da aplicação proporcione uma compreensão das condições de consciência situacional dos operadores humanos e das entidades que possuem algum nível de inteligência dentro do sistema, inicialmente foram definidos os agentes que dele participam. Um agente, no contexto desta análise, é uma entidade que combina certo grau de complexidade com certo grau de independência dentro do sistema. Os agentes identificados nesta aplicação estão desenhados na Fig. 6-12. Foi preservada a nomenclatura em inglês para manter a homogeneidade com projetos similares realizados com a metodologia TOPAZ, com o documento de especificação detalhada (presente em (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006)) e com o código de simulação desenvolvido para este trabalho. Além desses motivos, o trabalho de modelagem foi desenvolvido no NLR (*National Aerospace Laboratory*, Holanda), e deve estar de acordo com os padrões de documentação desta instituição. É importante relatar que, de todo o modelo descrito em (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006), a contribuição do autor desta tese está concentrada nos agentes ATS, ATCo, GNC e ASAS, nestes últimos por causa da operação de Espaçamento Aerotransportado, para a qual não havia modelo prévio desenvolvido em SDCPN. Os outros agentes foram em sua maior parte definidos com base em modelos existentes em outros projetos realizados com a metodologia TOPAZ.

Os agentes do sistema são:

- *Aircraft*: representa a aeronave como uma combinação de seus elementos essenciais em relação à segurança da execução do voo: o espaço aéreo onde se encontra, o modo de funcionamento dos motores, o modo de funcionamento do sistema de navegação, e

o modo de indicação de situações diversas de emergência relacionadas à execução do voo.

Fig. 6-12: Agentes da Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado.

- *GNC (aircraft Guidance, Navigation and Communication systems)*: inclui sistemas de controle, sistemas de determinação da própria posição e sistemas de comunicação da aeronave;
- *ASAS*: representa o ASAS conforme a definição conceitual da ICAO (2003);
- *PF (Pilot Flying)*: representa o agente humano Piloto Operador (as funções do Piloto Operador estão explicadas na seção 5.6.6);
- *PNF (Pilot Not Flying)*: representa o agente humano Piloto Monitorador (as funções do Piloto Monitorador estão explicadas na seção 5.6.6);
- *ATS (Air Traffic Services) System*: inclui a estação de Rádio-Telecomunicação de solo, os satélites de navegação e os sistemas de vigilância disponíveis nas instalações do Controle de Tráfego Aéreo; e
- *ATCo (Tactical Air Traffic Controller)*: responsável por controlar o tráfego de aeronaves dentro do espaço aéreo de interesse.

É importante observar na Fig. 6-12 que existem dois grupos correspondentes a aeronaves (*Aircraft-i* e *Aircraft-j*), e o motivo disso é que a operação de espaçamento temporal aerotransportado só ocorre com, no mínimo, duas aeronaves.

Cada um dos agentes aqui apresentados, por sua vez, divide-se em componentes menores denominados Redes de Petri Locais (LPN – *Local Petri Net*).

6.3.2 *Redes de Petri Locais*

As Redes de Petri Locais (LPN), os arcos de conexão entre elas e as Redes de Petri de Interação (IPN – *Interaction Petri Net*), constituem um formalismo que está sobre a definição de SDCPN, e não alteram a definição de SDCPN, mas apenas fornecem um meio de simplificar a definição do modelo, diminuindo consideravelmente o número de arcos e facilitando o raciocínio orientado a objeto na modelagem. O raciocínio orientado a objeto, por um lado, induz à diminuição do número de nós e arcos da rede, pois os objetos funcionam como “bases geradoras” do espaço de estados da rede e, por outro lado, facilita a codificação posterior do modelo em linguagem de programação. A definição do formalismo de interconexão entre LPNs e IPNs encontra-se no Apêndice A de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006). É importante frisar aqui que, neste modelo, bem como em diversos outros realizados com a metodologia TOPAZ, apenas uma ficha é permitida entre os locais de uma LPN. Isto simplifica consideravelmente o funcionamento do modelo.

Conforme mencionado no início desta seção, a relação de LPNs aqui não é exaustiva, e visa apenas à compreensão geral do modelo. Mesmo para as LPNs apresentadas aqui, não foram explicitados todos os detalhes de funcionamento, que estão explicados em diversas seções de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006). Também existe nesta seção a necessidade de manter a nomenclatura em inglês para manter a coerência com a documentação gerada neste trabalho.

É importante atentar para o fato de que, ao definir as LPNs, foram feitas diversas hipóteses sobre o funcionamento de equipamentos, sobre a dinâmica de voo das aeronaves envolvidas, e a dinâmica de atuação dos operadores humanos, em um cenário real de aproximação de aeronaves na E-TMA, de modo a proporcionar as condições de aplicação do Espaço Temporal Aerotransportado ASAS. Exemplos dessas hipóteses são as distribuições probabilísticas das velocidades iniciais das aeronaves, e também os tempos de realização de tarefas dos operadores humanos. Os tipos de distribuições probabilísticas e os parâmetros destas distribuições constituem pressupostos da análise de risco, e foram escolhidos por similaridade com outros projetos realizados com a metodologia TOPAZ, e também de acordo com estimativas realizadas pelo autor desta tese, de acordo com a pesquisa bibliográfica realizada no contexto deste trabalho de investigação científica. Para esclarecimento sobre as distribuições probabilísticas assumidas e seus parâmetros, é possível encontrar as informações pertinentes no Apêndice A e no documento (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006).

6.3.2.1 LPNs do Agente Aeronave

As LPNs do Agente Aeronave são mostradas na Fig. 6-13. A LPN *Aircraft Evolution Mode* representa o espaço aéreo onde se encontra a aeronave, sendo que o lugar *System Entrance* indica que a aeronave está em um espaço aéreo onde se faz um ajuste prévio de velocidade e posição para preparação do Espaçamento Temporal Aerotransportado. O lugar *TBSAS* indica que a aeronave já está no espaço aéreo onde pode ser iniciado o Espaçamento ASAS, e onde tal procedimento se desenrola. O lugar *Final Approach* representa um espaço aéreo onde o Espaçamento ASAS pode ser finalizado, pois a aeronave da frente está prestes a pousar. Ainda nesta LPN, o lugar *System Exit* representa que a aeronave saiu do espaço aéreo de interesse, seja por limites horizontais ou verticais.

Fig. 6-13: LPNs do Agente Aeronave.

A LPN *Aircraft Engine System-i* indica a ocorrência de qualquer falha detectável nos motores da aeronave. O tempo de transição entre os estados de falha e não falha segue uma distribuição de probabilidade exponencial.

A LPN *Aircraft Navigation-i* representa a ocorrência de uma falha detectável no sistema de navegação de aeronave (devido a diversas falhas modeladas em outras LPNs, cujas conexões com *Aircraft Navigation-i* não estão exibidas), falha esta que é gerada no agente GNC que será descrito mais adiante.

Por fim, a LPN *Aircraft Emergency Mode-i* representa a ocorrência de qualquer tipo de emergência na aeronave que não seja representada em outra LPN do modelo. Os tempos de ocorrência de uma falha e da recuperação da falha seguem distribuições exponenciais.

6.3.2.2 LPNs do Agente GNC

O Agente GNC (*aircraft Guidance, Navigation and Communication systems*) representa os sistemas de controle, navegação e comunicação da aeronave. Como ele possui um número considerável de LPNs, elas são aqui apresentadas em três grupos: Comportamento de Controle da Aeronave, Processamento de Posição da Aeronave e Comunicação da Aeronave.

Comportamento de Controle da Aeronave

O comportamento de controle da aeronave representa basicamente o funcionamento do sistema de Piloto Automático, e está modelado na LPN *Aircraft Guidance Behaviour*, conforme a Fig. 6-14. Esta LPN tem poucos locais, mas, no entanto, suas fichas possuem uma cor contendo um grande número de componentes, e funções de cor de ficha com certo grau de complexidade.

Fig. 6-14: LPNs do Comportamento de Controle da Aeronave, parte do agente GNC.

Os três locais desta LPN indicam se a aeronave está em voo nivelado (*Level*), está mudando de altitude (*Climb/Desc. standard vertical speed*) ou em manobra de evasão (*Evasion*) de rota. Para todos os locais desta LPN, o tipo de cor associado é denominado *AC State* e possui os componentes relacionados na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Componentes do tipo de cor *AC State*.

Componente	Espaço de Estado	Definição
y	$\mathbb{R}^6$	Vetor do estado real da aeronave: y_1, y_2, y_3 : posição espacial da aeronave; y_4 : velocidade da aeronave em relação ao ar (TAS); y_5 : ângulo de caminho horizontal da aeronave; y_6 : ângulo de caminho vertical da aeronave.
$\hat{y}$	$\mathbb{R}^6$	Vetor do estado estimado da aeronave, utilizado apenas dentro desta LPN, com subcomponentes correspondentes às subcomponentes da componente y .
$\hat{x}_t$	$\mathbb{R}^7$	Vetor do estado estimado da aeronave, publicamente utilizado no sistema (pelo ATS e por outras aeronaves): $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$: posição espacial da aeronave; $\hat{x}_4$: velocidade da aeronave em relação ao ar (TAS – <i>True Airspeed</i>); $\hat{x}_5$: velocidade da aeronave em relação ao solo; $\hat{x}_6$: ângulo de caminho horizontal da aeronave; $\hat{x}_7$: velocidade vertical da aeronave.
$\dot{y}$	$\mathbb{R}^6$	Derivada dos componentes do estado real da aeronave.
$\dot{\hat{y}}$	$\mathbb{R}^6$	Derivada dos componentes de estado estimado da aeronave, utilizado apenas dentro desta LPN.
w	$\mathbb{R}^3$	Vetor tridimensional da velocidade vento.
z^{ref}	$\mathbb{R}$	Altitude de referência, a qual a aeronave precisa atingir.
v^{ref}	$\mathbb{R}$	Velocidade de referência (velocidade calibrada em relação ao ar)
u	$\mathbb{R}^3$	Entradas de controle da aeronave: u_1 : Empuxo; u_2 : Ângulo de ataque; u_3 : Ângulo de rolagem.
θ	$\mathbb{N}$	Tipo de aeronave

É importante notar que há três vetores que definem o estado da aeronave (y , $\hat{y}$ e $\hat{x}_t$), e a existência deles deve-se ao fato de haver erros de medição nos sensores da aeronave. O estado real da aeronave é dado pelo vetor y , sendo que este evolui de acordo com a equação diferencial a seguir:

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} y_4 \cos(y_5) \cos(y_6) + w_1 \\ y_4 \sin(y_5) \cos(y_6) + w_2 \\ y_4 \sin(y_6) + w_3 \\ \frac{u_1 \cos(u_2) - D_\theta(u_2, y_4, y_3)}{m_\theta} - g \sin(y_6) \\ \frac{g}{y_4} \tan(u_3) \\ \frac{L_\theta(u_2, y_4, y_3) + u_1 \sin(u_2)}{m_\theta y_4} \cos(u_3) - \frac{g}{y_4} \cos(y_6) \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

Explicações mais detalhadas sobre esta equação podem ser encontradas na seção 1 do Apêndice A. As funções $D_\theta : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}$ e $L_\theta : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}$ fornecem o valor da força de arrasto e sustentação aerodinâmicas, respectivamente. Ambas são calculadas para as variáveis de entrada ângulo de ataque u_2 , velocidade relativa ao ar y_4 e altitude y_3 , e são definidas para um dado modelo de aeronave θ . Observe que as três últimas equações do sistema (6-2) dependem das entradas de controle do vetor u . Estas, por sua vez, são calculadas a partir do estado estimado da aeronave $\hat{y}$ e de sua derivada $\dot{\hat{y}}$. A fórmula vetorial utilizada para calcular u , para os lugares *Level* e *Climb/Desc. standard vertical speed*, é:

$$u = \begin{bmatrix} T_{\text{TECS},\theta}(\hat{y}, \dot{\hat{y}}, z^{\text{ref}}, v^{\text{ref}}) \\ \alpha_{\text{TECS},\theta}(\hat{y}, \dot{\hat{y}}, z^{\text{ref}}, v^{\text{ref}}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

Já para o lugar *Evasion*, a fórmula fica:

$$u = \begin{bmatrix} T_{\text{TECS},\theta}(\hat{y}, \dot{\hat{y}}, z^{\text{ref}}, v^{\text{ref}}) \\ \alpha_{\text{TECS},\theta}(\hat{y}, \dot{\hat{y}}, z^{\text{ref}}, v^{\text{ref}}) \\ \begin{cases} 0 & \text{se } |\hat{y}_5 - \psi_{\text{esc}}| \cong 0 \\ \phi_{\text{max}} & \text{caso contrário} \end{cases} \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

Estas fórmulas significam que as entradas de controle u_1 (empuxo) e u_2 (ângulo de ataque) são calculadas, respectivamente, por meio das funções complementares $T_{\text{TECS},\theta} : \mathbb{R}^4 \mapsto \mathbb{R}$ e $\alpha_{\text{TECS},\theta} : \mathbb{R}^4 \mapsto \mathbb{R}$ do sistema de piloto automático denominado TECS – *Total Energy Control System*, o qual é ajustado ao modelo de aeronave θ , e está explicado na seção 2 do Apêndice A. Parte dos valores de entrada destas funções é proveniente do sistema de sensores da aeronave e, por este motivo, são utilizados os vetores de estado estimado $\hat{y}$ e de sua derivada $\dot{\hat{y}}$, que contém erros dos sensores. Já o componente u_3 (ângulo de rolagem) é mantido normalmente em zero para manter o vôo em linha reta no plano horizontal e, em caso de evasão de rota, ele pode assumir o valor ϕ_{max} , o que significa que a aeronave fará uma curva até atingir o rumo de escape ψ_{esc} .

Para determinar o vetor de estado estimado $\hat{y}$, assumiu-se um modelo de erro de instrumentação para cada um de seus componentes. O esquema de estimativa de erro ficou de acordo com a Fig. 6-15. Os erros de medição de posição e velocidade horizontais $\varepsilon_i^{\text{est,hor}}$ e os

verticais $\varepsilon_t^{\text{est,ver}}$, provenientes do Grupo de Processamento de Posição e Velocidade apresentadas logo adiante, são somados ao vetor y , resultando no vetor $\hat{y}$, o qual é utilizado pelo piloto automático. Esta soma de erros artificialmente gerados foi a maneira encontrada de simular erros estocásticos que acontecem na prática.

O vetor $\hat{x}$ é o vetor que será transmitido para os outros agentes por meio do transmissor ADS-B e do transponder Modo S, e mesmo para a tripulação por meio dos mostradores do painel da aeronave. Este vetor é calculado em função do vetor $\hat{y}$ e de regras de propagação de erro de acordo com a equação (6-5).

Fig. 6-15: Estimativa de erro dentro da malha de controle da aeronave.

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \hat{y}_3 \\ \hat{y}_4 \\ \sqrt{\hat{y}_1^2 + \hat{y}_2^2} + \frac{v_x \hat{y}_1 + v_y \hat{y}_2}{\sqrt{\hat{y}_1^2 + \hat{y}_2^2}} \\ \arctan(\dot{y}_2 / \dot{y}_1) | \dot{y} \neq 0 \\ \dot{y}_3 + v_{t,\perp}^{\text{est,ver}} \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

Nesta equação, v_x e v_y são os componentes de $\varepsilon_t^{\text{est,hor}}$ referentes à velocidade horizontal, e $v_{t,\perp}^{\text{est,ver}}$ a componente de $\varepsilon_t^{\text{est,ver}}$ referente à velocidade vertical.

Grupo de Processamento de Posição e Velocidade

As LPNs de processamento de posição e velocidade influenciam na precisão com que se estima, a bordo da aeronave, sua posição e velocidade. Estas LPNs estão mostradas na Fig. 6-16.

A LPN *Aircraft GPS Receiver* determina se o dispositivo de recepção de sinal dos satélites de navegação está ou não funcionando. A presença de uma ficha no lugar *Not working* desta LPN habilita a transição do estado *GPS estimate* para o estado *IRS estimate* na LPN *Aircraft horizontal POS-PROC*. Esta LPN, por sua vez, representa diferentes modos de cálculo de posição e velocidade no plano horizontal, que possuem diferentes amplitudes de erro. O lugar *GPS Estimate* representa o cálculo de posição utilizando sinal recebido em condições normais dos satélites de navegação. O lugar *Corrupted estimate* representa o cálculo de posição com sinal de satélite recebido com erro não detectado, enquanto o lugar *Degraded estimate* representa o cálculo de posição com sinais recebidos em quantidade insuficiente para se obter a máxima precisão do sistema de navegação por satélite. O último lugar desta LPN é o *IRS estimate*, que representa o cálculo de posição utilizando-se apenas da instrumentação inercial da aeronave (IRS). Este método de cálculo oferece um nível de precisão muito menor que quando se utiliza informações de navegação satelital. Por razões de simplicidade, assumiu-se que não são utilizados auxílios à navegação terrestres no cálculo da posição.

Fig. 6-16: LPNs de Processamento de Posição e Velocidade do GNC.

A LPN *Aircraft Air Sensors* indica se os sensores de altitude e velocidade do ar estão funcionando corretamente (*Working*) ou em estado degradado (*Degraded*). A presença de uma ficha no estado *Degraded* desta LPN habilita a transição entre os locais *Correct* e *Degraded* da LPN *Aircraft Air Data PROC*.

As cores das fichas nas LPNs *Aircraft horizontal POS PROC* e *Aircraft Air Data PROC* determinam respectivamente os vetores de erro $\varepsilon_i^{\text{est,hor}}$ e $\varepsilon_i^{\text{est,ver}}$, utilizado na LPN de Comportamento de Controle da Aeronave.

Grupo de Comunicação da Aeronave

Os dispositivos de comunicação da aeronave são: Rádio Telecomunicação (R/T), Receptor ADS-B, Transmissor ADS-B e Transponder Modo S. As LPNs deste grupo referem-se a estes equipamentos e estão apresentadas na Fig. 6-17.

Fig. 6-17: LPNs de Comunicação da Aeronave.

Todos estes equipamentos têm os tempos de falha e de reparo com distribuição probabilística exponencial (transição de atraso – símbolo D). O tempo médio para ocorrência dessas transições está definido no Apêndice G de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006). A LPN *Aircraft R/T* possui apenas um lugar com uma única cor, que representa a última informação transmitida ou recebida pelo equipamento de rádio-telecomunicação da aeronave, funcionando como uma memória de curto prazo para esta informação.

6.3.2.3 LPNs do Agente ASAS

O agente ASAS possui as três LPNs apresentadas na Fig. 6-18. A LPN *ASAS Surveillance* possui uma ficha cuja cor contém informações de estado de todas as aeronaves que estejam ao alcance de seu receptor ADS-B, mais a informação do estado da própria aeronave. A LPN *ASAS System Mode* possui os locais *Working*, que representa o estado de funcionamento normal do ASAS, o lugar *Failure*, em que o ASAS deixa de executar suas funções, e o estado

Corrupted, onde o ASAS está funcionando com falhas não detectáveis. Conforme se observa pelo arco habilitador entre o lugar *Working* e a LPN *ASAS Spacing*, as transições entre os locais de *ASAS Spacing* só ocorrem se houver uma ficha no lugar *Working*, ou seja, se o ASAS estiver funcionando normalmente.

Fig. 6-18: LPNs do Agente ASAS.

A LPN *ASAS Spacing* determina o estágio de execução da função de espaçamento do ASAS. *Target acquisition* é o estágio inicial, em que o Piloto Monitorador pode seleccionar uma aeronave como alvo por intermédio do CDTI (*Cockpit Display of Traffic Information*). Feito isso, a ficha passa para o lugar *Spacing Setting*, no qual o Piloto Monitorador pode seleccionar um tempo de espaçamento. Feito isso, a ficha passa para o lugar *Remain*, quando o ASAS passará a calcular uma velocidade requerida para manter o espaçamento requerido. O cálculo desta velocidade depende da informação na LPN *ASAS Surveillance*, e é feito de acordo com o algoritmo descrito na seção 5 do Apêndice A. Existem transições que podem ocorrer dos estados *Spacing Setting* e *Remain* para *Target Acquisition*. Estas transições são disparadas nos seguintes casos:

- 1) Quando a aeronave desvia da rota e não tem mais condições de manter o espaçamento em relação à aeronave seleccionada como alvo. O caso típico de ocorrência deste desvio é a manobra evasiva de resolução de conflito;
- 2) Quando o piloto monitorador detecta que é o momento de encerrar o procedimento de espaçamento e o finaliza; e

3) Quando a trilha da aeronave alvo desaparece da cor da ficha da LPN *ASAS Surveillance*. Neste modelo, isto pode ocorrer por falha no transmissor ADS-B da aeronave alvo, ou no receptor ADS-B da própria aeronave.

Na Fig. 6-18, existem arcos que terminam na borda da LPN *ASAS Spacing*, que influenciam em todas as transições representadas nesta LPN. O significado mais preciso de tal notação está explicado no Apêndice A de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006).

6.3.2.4 LPNs do Agente Piloto Operador

As LPNs do agente Piloto Operador são apresentadas na Fig. 6-19. O agente Piloto Operador está, juntamente com o Piloto Monitorador e o ATCo, entre os agentes mais complexos do modelo. A partir da análise do desempenho de tarefas do Piloto Operador, descrita no Apêndice P de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006), elaboraram-se LPNs que servem de modelo para estes agentes. A LPN *Task Performance PF* apresenta um padrão de estágios de realização de tarefas que se repete nos outros operadores humanos, e que já foi utilizado em outros projetos com a metodologia TOPAZ. Os estágios de realização de tarefas são representados pelos locais desta LPN, descritos como:

(T1) *Monitoring*: estágio em que o piloto coleta, reúne e integra informação sobre a meta corrente;

(T2) *Monitoring and Decision*: neste estágio, usando informações providas pelos sistemas de auxílio e, possivelmente, por outros operadores humanos e, dependendo de sua consciência situacional, o piloto decide-se sobre:

- se é preciso consultar um colega, e caso seja, qual a consulta a ser feita;
- se uma ação particular é requerida e, caso seja, quais são seus parâmetros de aplicação;

(T3) *Coordination*: estágio em que o piloto coordena com outros operadores humanos, comunicando, perguntando e respondendo, e checando a consistência de suas decisões;

(T4) *Execution*: estágio em que o piloto está efetivamente operando o controle da aeronave, ativando funções de controle da aeronave por meio dos dispositivos de controle;

(T5) *Execution Monitoring*: estágio em que o piloto observa os eventos decorrentes da ação executada; e

Fig. 6-19: LPNs do Agente Piloto Operador.

(T6) *Monitoring and Goal Prioritisation*: estágio em que o piloto coleta informação e decide qual de suas metas requer atenção logo em seguida.

Assume-se neste modelo, que o piloto faz exclusivamente um dos estágios *T1-T6* em cada instante. Isto é uma simplificação da realidade, pois é sabido que, para tarefas repetitivas, o ser humano pode realizar mais que uma tarefa ao mesmo tempo.

Continuando a descrição das LPNs da Fig. 6-19, é apresentada a LPN *Current Goal PF*, que determina a meta de tarefa assumida pelo piloto operador em um dado instante. Estas metas são:

(C1) *Collision Avoidance*: foi detectado que uma colisão é possível de acontecer em um momento próximo (até 1 minuto), e o piloto precisa realizar uma manobra para evitá-la. Quando esta meta está sendo realizada pelo piloto, ele o faz com o auxílio do ACAS;

(C2) *Emergency Actions*: para situações em que o piloto detectou que o vôo não pode prosseguir de maneira segura, ações de emergência precisam ser realizadas. Esta meta representa diversas ações que não foram modeladas especificamente;

(C3) *Speed Adjustment*: o piloto precisa ajustar a velocidade para adequar-se ao espaço aéreo e à seqüência de aproximação;

(C4) *Vertical Navigation*: o piloto precisa ajustar a altitude para adequar-se ao procedimento de aproximação controlado;

(C5) *Horizontal Navigation*: o piloto realiza um ajuste na direção horizontal da aeronave; e

(C6) *Miscellaneous*: todas as demais metas do piloto operador não incluídas nas anteriores.

A meta corrente é modificada de duas maneiras. Por um lado, por meio da transição *interrupt*, que é disparada por alertas sonoros provenientes da IPN *Audio PF*, que representa a percepção sonora do Piloto Operador. Neste caso, a próxima meta será decidida com base no alerta sonoro recebido. Caso o alerta esteja associado a uma meta mais prioritária que a meta corrente, a ficha da LPN *Current Goal PF* sairá da meta corrente e irá para a meta exigida. Por exemplo, se o alerta se referir a uma situação de emergência, e a meta corrente for *C4*, então a ficha sairá de *C4* e uma ficha aparecerá em *C2* (o entendimento completo de como isto ocorre pode ser obtido pela leitura dos Apêndices A e J de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006)). A decisão sobre a meta corrente também utiliza a informação da LPN *Goal Memory PF*, que representa a memória de metas que estão sendo perseguidas pelo Piloto Operador. A transição *subsequent* da LPN *Current Goal PF* é habilitada ao final de um ciclo de realização de tarefa, quando aparece uma ficha no lugar *T7* da LPN *Task Performance PF*,

e o piloto precisa decidir qual é a próxima meta. As metas armazenadas na *LPN Goal Memory PF* são então levadas em consideração.

A realização de tarefas do piloto operador é influenciada ainda pelas outras três LPNs da Fig. 6-19. A *LPN Mode & Intent SA PF* representa o estado-alvo da aeronave desejado em um determinado instante, incluindo a velocidade e a altitude a serem atingidas. A *LPN State SA* representa o conhecimento de indicações de falha na aeronave, e a *LPN Cognitive Mode* representa o modo cognitivo do piloto, que é um modelo de comportamento derivado de Hollnagel (1993). Quando o piloto tem poucas metas a perseguir, a ficha desta LPN fica no lugar *Tactical*. Por outro lado, quando o piloto tem um número excessivo de metas a perseguir, a ficha desta LPN fica no lugar *Opportunistic*, significando que o piloto estará mais propenso a erros.

6.3.2.5 LPNs do Agente Piloto Monitorador

As LPNs do agente Piloto Monitorador foram elaboradas de maneira similar às do Piloto Operador. Será apresentada aqui nesta seção apenas a *LPN Current Goal PNF*, que possui locais referentes às metas específicas do Piloto Monitorador. Esta LPN está apresenta na Fig. 6-20.

Fig. 6-20: LPN do Agente Piloto Monitorador.

As metas do Piloto Monitorador são:

(C1) *Emergency Actions*: realização de ações necessárias ao tratamento de emergências que comprometam a segurança de voo. Esta meta é disparada quando os indicadores de falha da aeronave são ativados;

(C2) *External Communication*: esta é uma das metas mais importantes do Piloto Monitorador, que consiste em realizar a comunicação com o ATCo, ouvindo as instruções, realizando cotejamento, e transmitindo relatórios e requisições;

(C3) *ASAS Spacing Target Selection*: o piloto monitorador identifica a aeronave alvo de espaçamento no CDTI, e a seleciona por meio de um dispositivo de interface humano-computador;

(C4) *ASAS Spacing Setting*: Ajuste de Espaçamento ASAS: o piloto monitorador digita o valor de espaçamento a ser aplicado (por exemplo, 90 segundos), e o ASAS passa a calcular a velocidade requerida para manutenção do espaçamento;

(C5) *ASAS Spacing Interruption*: o piloto monitorador desativa, através de um dispositivo de interface, o cálculo de velocidade requerida e conexão do ASAS com o piloto automático. O ASAS volta ao estado inicial da função de espaçamento. Esta meta é disparada, em geral, por instruções do ATCo; e

(C6) *Miscellaneous*: demais metas não incluídas nas anteriores.

As demais LPNs do Piloto Monitorador encontram-se definidas no Apêndice K de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006).

6.3.2.6 Visão Parcial da Integração das LPNs

Para proporcionar uma compreensão de como as LPNs descritas até o momento interagem, foram incluídas aqui as figuras 6-22 e 6-23. Estas figuras apresentam as LPNs *Task Performance PXX – Goal N*, que representam instâncias das LPNs *Task Performance PF* e *Task Performance PNF*, para cada meta das LPNs *Current Goal PF* e *Current Goal PNF*, respectivamente. Estas instâncias foram desenhadas apenas com os locais e transições relevantes para compreender a integração entre as LPNs. Na primeira, observam-se as LPNs *Task Performance PF – Goal 3* e *ASAS Spacing* fornecendo fichas para a LPN *Aircraft Guidance Behaviour*. Isto significa que as alterações de velocidade são realizadas no estágio de execução da meta C3 (*Speed Adjustment*) do Piloto Operador, ou diretamente pelo ASAS, para manutenção do espaçamento requerido. Também se observa a LPN *Task Performance PF – Goal 4* fornecendo fichas para *Aircraft Guidance Behaviour*. Isto representa os ajustes de altitude feitos pelo Piloto Operador durante a execução da meta C4 (*Navigation Vertical*). Por outro lado as fichas provenientes da execução da meta C5 (*Navigation Horizontal*) do Piloto Operador (*Task Performance PF – Goal 5*) fornecem rumos horizontais, e seu efeito

em *Aircraft Guidance Behaviour* é a transição de fichas para o lugar *Evasion*, significando que a aeronave está escapando da rota.

As cores de *Aircraft Guidance Behaviour* são influenciadas pelos erros provenientes das LPNs de processamento de posição e velocidade: *Aircraft Horizontal POS-PROC-i* e *Aircraft Air Data PROC-i*. Por sua vez, a cor da ficha de *ASAS Surveillance* (no que se refere ao estado da própria aeronave) e de *ATC Surveillance Track-i* (referente à informação detectada pelo radar, explicada na seção 6.3.2.7) é determinada pelas cores de *Aircraft Guidance Behaviour*. Por fim, o espaço aéreo ocupado pela aeronave, indicado em *Aircraft Evolution Mode*, também é influenciado pela posição da aeronave, que é cor de *Aircraft Guidance Behaviour*.

Fig. 6-21: Integração de LPNs relacionadas com o controle da aeronave.

Na Fig. 6-22, observa-se que as transições em *ASAS Spacing* só ocorrem se houver uma ficha no lugar *Working* de *ASAS System Mode*, o que significa que o ASAS “trava” se ocorre uma falha (as consequências para a segurança podem ser negativas na aeronave seguidora, se o

ASAS estiver propondo uma velocidade maior que a velocidade da aeronave líder). Observam-se também como a execução de tarefas do Piloto Monitorador determina o funcionamento da função de espaçamento ASAS: na execução da meta *C3* (*Task Performance PNF – Goal 3*), seleciona-se a aeronave alvo, e a ficha sai de *Target Acquisition* e vai para *Spacing Setting* em *ASAS Spacing*. Já na execução da meta *C4* (*Task Performance PNF – Goal 4*), a ficha sai de *Spacing Setting* e vai para *Remain*; por fim, na execução da meta *C5* (*Task Performance PNF – Goal 5*), a ficha sai de *Remain* e volta para *Target Acquisition*, indicando fim de espaçamento. Outro detalhe importante a ser notado é que o Piloto Operador deve estar ciente em qual estágio de realização do espaçamento o ASAS se encontra, e isto é sinalizado por meio do lugar de interação *Int-ASp-SAPF* à *LPN Mode & Intent SA PF*. A interação com a LPNs *ASAS Surveillance* foi explicada na seção 6.3.2.3.

Fig. 6-22: Integração de LPNs relacionadas com o ASAS.

A integração das LPNs relacionadas ao controle da aeronave implica na adoção de uma malha de controle conforme a Fig. 6-23. Parte desta figura é idêntica à Fig. 6-15, explicada na seção 6.3.2.2; a outra parte, decorrente da presença do ASAS, representa o cálculo da velocidade necessária v^{ref} para manter o espaçamento em relação à Aeronave Líder. O bloco Conversão transforma o vetor $\hat{y}$ do estado da aeronave, conhecido apenas dentro da aeronave seguidora, para o vetor de estado $\hat{x}$ que é necessário ao processamento do ASAS (sendo transmitido por ADS-B para as outras aeronaves).

Fig. 6-23: Estimativa de erro dentro da malha de controle da aeronave.

6.3.2.7 LPNs do Agente ATS

Esta seção apresenta as LPNs do agente ATS (*Air Traffic Services System*), iniciando pelas LPNs *Ground R/T* e *Ground R/T Availability*, que representam a estação de comunicação por rádio, por canal de áudio, comum entre o ATCo e a todas as aeronaves do setor. Estas LPNs são mostradas na Fig. 6-24.

Fig. 6-24: LPNs de comunicação do agente ATS.

A LPN *Ground R/T Availability* modela as falhas no sistema de rádio telecomunicação de solo, e também a indisponibilidade do canal comum de comunicação, no caso de interferência. As transições da LPN *Ground R/T* só ocorrem se houver uma ficha no lugar

Working da LPN *Ground R/T Availability*. O lugar *RT State* de *Ground R/T* armazena uma ficha cuja cor informa o conteúdo da última transmissão realizada no canal de R/T. O funcionamento das transições de *Ground R/T* será detalhado mais adiante no texto, na seção 6.3.2.9.

O ATS também possui a LPN *Navigation System Global / GNSS*, que representa a disponibilidade dos sinais de satélites de navegação. A ficha desta LPN pode estar no lugar *Working*, onde todos os sinais estão disponíveis em perfeito estado; no lugar *Degraded*, onde menos sinais estão disponíveis, ou há alguma falha detectável nos sinais; no lugar *Corrupted*, onde existe uma falha não-detectada nos sinais de satélite; ou, finalmente, no lugar *Down*, onde não é possível extrair nenhuma informação útil dos sinais de satélite. O lugar onde a ficha desta LPN se encontra influencia na LPN *Aircraft Horizontal POS-PROC*, que por sua vez determina a precisão no cálculo da posição da aeronave, a bordo da aeronave.

Fig. 6-25: LPN do Sistema de Navegação por Satélite.

As outras duas LPNs do agente ATS são *ATC Surveillance Systems Mode* e *ATC Surveillance Track-i Processing*, que integram o sistema de vigilância de solo. A primeira modela a disponibilidade do sistema de radar e o sistema de rastreamento de alvos de radar, enquanto a segunda modela, para cada aeronave, o processamento de sua trilha de radar. Estas LPNs, entre outras, estão mostradas na Fig. 6-26.

Fig. 6-26: LPNs relacionadas ao sistema de vigilância ATIS.

Existem dois locais em *ATC Surveillance Track i Processing*: *Nominal* e *Extrapolated*. No primeiro, a posição da aeronave está sendo atualizada de acordo com os dados recebidos do radar, que necessita do funcionamento do transponder Modo S na aeronave. Caso este transponder não esteja funcionando, ou o sistema de radar e processamento de trilha não esteja disponível, o que ocorre quando há uma ficha em *Not Working* na LPN *ATC Surveillance Systems Mode*, então a informação de posição da aeronave é extrapolada a partir da última posição e do último vetor velocidade, o que implica em uma imprecisão crescente nesta informação. Observe que os dados de posição da aeronave em *ATC Surveillance Systems Mode* dependem das cores da LPN *Aircraft Guidance Behaviour i*, e determinam o conhecimento que o ATCo tem sobre a aeronave *i*, armazenado na LPN *ATCo SA Aircraft i*, parte do agente ATCo.

6.3.2.8 LPNs do Agente ATCo Tático

O modelo de agente ATCo Tático seguiu os mesmos princípios do modelo dos pilotos. Entretanto, existem algumas peculiaridades do comportamento do ATCo. A primeira é que a memória do ATCo deve ter uma área separada para cada aeronave, o que implica que haja

diversas instâncias de consciência situacional, uma para cada aeronave. Outra diferença é que os estágios de realização de tarefa *T1 – Monitoring*, *T2 – Monitoring and Decision* e *T6 – Monitoring and Goal Prioritisation*, são realizados com mais independência em relação à meta corrente, pois a tarefa do ATCo exige o acompanhamento simultâneo de diversas aeronaves. Isto pode ser observado na Fig. 6-27, pois a transição *subsequent* da LPN *Current Goal* é disparada por fichas da transição de saída de *T2* e de entrada de *T6*. As LPNs do agente ATCo Tático são mostradas na Fig. 6-27.

Fig. 6-27: LPNs do agente ATCo Tático.

As decisões do ATCo são influenciadas pelas LPNs *ATCo Situational Awareness about Aircraft i* , que são as instâncias de consciência situacional para cada aeronave i . A transição $T6 \rightarrow T1$ em *Task Performance ATCo* envia uma ficha para atualizar a cor da ficha de $SA-i$, que contém a última informação que o ATCo memorizou sobre a aeronave i , posição e velocidade. O lugar $SA-i$ também recebe uma ficha de atualização da transição $T5 \rightarrow T6$, informando a situação da aeronave no procedimento de aproximação. Por exemplo, após o ATCo emitir uma instrução de seleção de alvo ASAS para uma aeronave, ele precisa

memorizar que a próxima instrução a ser emitida para aquela aeronave é a da aplicação do valor de espaçamento.

Observa-se na Fig. 6-27 que a execução de ações do ATCo, representada na transição de $T4$ para $T5$, está ligada à transmissão de instruções por voz pelo canal de rádio (LPN Ground R/T). Isto também é uma diferença considerável à realização de tarefas dos pilotos, que atuam diretamente sobre a aeronave.

Outra diferença entre o modelo do ATCo e o dos pilotos é que, ao menos nesta aplicação, o ATCo não é interrompido por alarmes. A razão desta escolha é que os alarmes podem desviar indevidamente a atenção do ATCo de uma aeronave para outra, no caso do espaço aéreo em estudo (E-TMA). Isto está explicado mais detalhadamente nos Apêndices I e P de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006).

6.3.2.9 Integração da Comunicação entre ATCo e Tripulação

A comunicação vocal entre ATCo e tripulação da aeronave se dá pelos lugares de interação $INT-ATC-RT-AC-i-RT$ e $INT-AC-i-RT-ATC$ entre as LPNs *Aircraft R/T* e *Ground R/T*, exibidos na Fig. 6-28.

Fig. 6-28: Integração da Comunicação entre ATCo e Tripulação.

Na mesma figura, observa-se a ligação entre a execução de tarefas do ATCo (*Task Performance ATCo*) e o conteúdo da informação transmitida por rádio. Do outro lado da comunicação, quando o equipamento de rádio de solo recebe alguma informação proveniente do transmissor da aeronave (*Aircraft R/T*), a memória do ATCo sobre aquela aeronave (*ATCo SA Aircraft i*) é atualizada com esta informação.

6.4 Implementação da SDCPN em Código de Simulação

A SDCPN resumidamente apresentada nas seções anteriores foi implementada em código de programação para simulação de seu comportamento. Foram utilizadas bibliotecas específicas de software, cedidas pelo NLR em uma licença específica para este trabalho de pesquisa. Muitas partes destas bibliotecas foram adaptadas para as necessidades específicas deste projeto, e também uma quantidade considerável de código foi elaborada para implementar as classes de cores de fichas e as lógicas de transições. Todo o código está em linguagem Java, de acordo com a especificação J2SE 5.0.

6.5 Considerações Finais do Capítulo

O modelo SDCPN da operação ‘Permanecer em Trilha’ ASAS foi resumidamente descrito neste Capítulo. A implementação computacional deste modelo, ao ser executada, simula uma amostra de operação da aplicação. Devido à natureza estocástica do modelo, cada execução do programa de simulação gera um resultado diferente no que se refere às trajetórias das aeronaves. O modelo foi desenvolvido de tal forma que o agente ATCo executa as ações necessárias para evitar colisão e, além disso, as trajetórias das aeronaves têm um comportamento ‘médio’ de manter um espaçamento seguro entre elas. Dessa forma, a ocorrência de colisão é um evento raro e, por isso, um número grande de execuções precisa ser gerado para se obter uma colisão. A razão entre o número de colisões ocorridas e o número total de execuções é uma estimativa da probabilidade de ocorrência de colisão da aplicação e, sendo assim, o próximo Capítulo descreve como foi estimada essa razão.

7 Cálculo do Risco da Aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado

Este capítulo apresenta o método utilizado para calcular os valores de risco da aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado modelada nos Capítulos 5 e 6, e a avaliação da incerteza para os valores do risco.

Na literatura a respeito da análise quantitativa de risco, é comum considerar o risco de uma operação como sendo o produto da probabilidade de ocorrência de uma situação insegura por um fator que mede a gravidade ou severidade de tal situação. A operação considerada aqui é o Espaçamento Temporal Aerotransportado, descrito em detalhes no Capítulo 5, e a situação perigosa considerada é a colisão entre a aeronave líder e a aeronave seguidora. Está fora de escopo nesta análise de risco a quantificação da gravidade de tal evento. Sabe-se que uma colisão de duas aeronaves civis em pleno ar dificilmente ocorre sem um número significativo de fatalidades; posto isso, parece secundário fazer uma quantificação gradativa da gravidade das conseqüências desta classe de colisão, variando de acordo com os possíveis cenários de ocorrência. Deste ponto em diante, para simplificar a terminologia, toda vez que o termo *risco* for usado, ele equivale à probabilidade de ocorrência de colisão entre aeronaves, dado que suas conseqüências podem ser assumidas deterministicamente como catastróficas.

7.1 Cálculo do Risco

Dada a complexidade do modelo da aplicação em estudo, apresentado no Capítulo 6, é inviável a utilização de métodos analíticos para cálculo da probabilidade de ocorrência de colisão entre aeronaves; por outro lado, o método Monte Carlo, que se baseia em simulação probabilística, apresenta-se como uma das soluções que pode tornar viável o cálculo da probabilidade de ocorrência de colisão na aplicação modelada. Esta seção explica os princípios desse método, e como ele foi otimizado para permitir seu uso em um tempo de computação viável.

7.1.1 O Método Monte Carlo

O método de simulação Monte Carlo refere-se a uma classe de algoritmos computacionais muito utilizada para se obter aproximações numéricas de funções complexas. Ele se distingue de outros métodos de simulação por ser estocástico e não-determinístico, utilizando variáveis

aleatórias. Este método envolve a geração de observações da ocorrência de eventos probabilísticos e o uso da amostra obtida para aproximar a função de interesse.

O método Monte Carlo consiste em realizar aleatoriamente um grande número de observações de um espaço amostral e contabilizar quantas delas pertencem a um determinado conjunto. A razão entre o número de observações caindo no conjunto de interesse sobre o total de observações determina a probabilidade estimada. Para ilustrar o caso particular de se estimar a probabilidade de colisão de um cenário de espaçamento temporal entre aeronaves, define-se N_s como o número de cenários simulados colocados na amostra, e c_i o indicador de colisão para o cenário i , isto é:

$$c_i = \begin{cases} 0 & \text{se o cenário } i \text{ não tem colisão} \\ 1 & \text{se o cenário } i \text{ tem colisão} \end{cases}$$

Se todos os cenários forem equiprováveis, então a probabilidade de colisão p é

$$p = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} c_i .$$

Seguindo esta idéia, se é esperado que p seja tão baixo quanto 10^{-9} (uma colisão a cada bilhão de operações), por exemplo, então o número mínimo necessário de cenários simulados para que o método Monte Carlo retorne um resultado estatisticamente aceitável é 10^9 . Assumindo que cada cenário exija 0,5 segundo para ser simulado, o número de horas mínimo necessário para calcular p seria de $1,4 \times 10^5$ horas ou, equivalentemente, 15 anos e meio de simulação contínua. Como um cenário de colisão é muito pouco para se obter uma precisão adequada, este período se multiplicaria ainda por certo número de vezes para se obter um resultado confiável. Por isso é preciso utilizar técnicas de aceleração do método Monte Carlo para diminuir o tempo total de simulação.

7.1.2 Aceleração do Método Monte Carlo

Existem diversas técnicas de otimização para acelerar o método Monte Carlo. A técnica que foi usada neste trabalho é denominada genericamente de Sistema de Partículas Interagentes (IPS – *Interacting Particles System*). Tal técnica foi inspirada no algoritmo de Cérou et al. (2002), e adaptada para sistemas híbridos por Krystul e Blom (2005). O IPS denomina uma observação com o termo *partícula*, de acordo com a idéia de fazer um filtro de partículas, no qual cada partícula é o cenário completo de uma instância SDCPN que modela a aplicação de tráfego aéreo (no caso desta tese, uma instância SDCPN contém a representação de um par de

aeronaves líder-seguidora). O IPS se beneficia de que a probabilidade de que uma aeronave colida no intervalo $[t, T_{\max}]$ é maior para aeronaves que estão com uma distância menor de separação no tempo t . Um filtro seleciona apenas as partículas onde as aeronaves possuem separação (distância espacial) abaixo de um determinado valor, salvando o estado destas, e eliminando as partículas que finalizem a execução sem atingir o valor do filtro. Isso se deve ao fato de que, nas demais partículas, a probabilidade de colisão entre aeronaves é desprezível. No próximo nível de simulação, as partículas selecionadas são replicadas para manter o número constante de partículas, e uma distância menor é utilizada na filtragem. Este processo é repetido, até que se atinjam as dimensões da aeronave, significando que a colisão ocorreu. As Figuras 7-1 e 7-2 ilustram o funcionamento do IPS.

Fig. 7-1: Filtragens no Sistema de Partículas Interagentes.

Na Fig. 7-1, as partículas inicialmente geradas correspondem às setas na extremidade esquerda, que são geradas com características determinadas por distribuições de probabilidade e evoluem estocasticamente até que o filtro de 4 NM (4 milhas náuticas) seja aplicado. Este filtro deixa passar apenas as partículas em que a distância entre uma aeronave e outra seja menor do que 4 NM. A razão entre a soma dos pesos das partículas que saem do filtro e a soma dos pesos das partículas que entram determina a probabilidade p_1 . As partículas que passam pelo filtro são utilizadas então no processo de reprodução, que resulta num número de partículas igual ao número existente antes da filtragem. Após a reprodução, as partículas evoluem estocasticamente e são submetidas a um novo filtro, desta vez utilizando 3 NM de separação máxima como critério de filtragem. O processo de reprodução e filtragem se repete, com obtenção das probabilidades p_i até que se obtenham partículas que passaram pelo filtro de 50 metros (entre os centros de massa das aeronaves), que é considerada a distância em que

as aeronaves colidiram. A probabilidade de colisão p pode ser então calculada como o produto das probabilidades intermediárias p_i .

A série de figuras 7-2 a 7-7 ilustra mais detalhadamente o processo de filtragem do IPS. Nelas são exemplificadas as posições e os deslocamentos relativos entre aeronaves seguidoras e líderes em procedimentos de aproximação a uma mesma pista de aeroporto. Cada par de aeronaves líder-seguidora é um cenário (tecnicamente um cenário equivale a uma partícula), e todos os cenários estão se deslocando em direção ao aeroporto de destino, mas a figura está sempre fixada na posição da aeronave líder, que foi feita coincidente para todos os cenários que estão sobrepostos na mesma figura. Na Fig. 7-2, são ilustrados dois cenários, numerados como 1 e 2, cada um deles contendo um par líder-seguidora. Eles são ilustrados separadamente e também de maneira sobreposta, sendo que a representação sobreposta será utilizada nas figuras subseqüentes para a explicação do algoritmo IPS.

Fig. 7-2: Cenários separados e sobrepostos para ilustração do IPS.

A Fig. 7-3 ilustra dez cenários distintos no instante inicial $t_0 = 0$. As posições e as velocidades iniciais das aeronaves líder e seguidora são sorteadas de distribuições probabilísticas e, por isso, existe um espalhamento das posições (ilustradas na Fig. 7-3) e das velocidades (o que não está ilustrado). Para efeitos ilustrativos, os cenários são deslocados de forma que, quando sobrepostos, as posições das aeronaves líderes sejam coincidentes.

Fig. 7-3: Dez cenários no instante inicial $t_i = 0$.

Os cenários iniciais são criados com distâncias entre aeronaves consideradas plausíveis para início de operação, assumindo que a distribuição das posições iniciais atende a uma distância média segura. Cada um dos cenários da Fig. 7-3 evolui separadamente e não interfere no outro, pois a interação entre aeronaves se dá somente entre pares líder-seguidora. Consideram-se, por simplicidade, pesos iguais a $1/10$ para todos os cenários, isto é, a presença de cada cenário é equiprovável em um estágio de filtragem. A evolução de cada cenário é estocástica, e a distância relativa entre cada par líder-seguidora pode aumentar ou diminuir, conforme as definições do modelo SDCPN. A evolução dos cenários no primeiro estágio de filtragem é ilustrada na Fig. 7-4. Os cenários evoluem até que um tempo máximo $T_{\max}$ seja atingido, ou que a aeronave seguidora atinja a fronteira delimitada pelo Filtro 1. Os pontos em que as aeronaves seguidoras atingem a linha do Filtro 1 estão indicados por pequenos círculos. No exemplo ilustrado, dois cenários atingiram essa linha, e os instantes t_j^1 em que isso ocorre são distintos em cada cenário, sendo que $t_j^k < T_{\max}$ (j é o número do cenário, k é o número do filtro). $T_{\max}$ é escolhido de forma a representar um tempo médio de permanência do par de aeronaves no setor de aproximação, até que a aeronave seguidora chegue à área de aproximação final ao aeroporto.

Fig. 7-4: Primeiro estágio de filtragem do IPS.

No instante em que um cenário atinge o limite de filtragem, ele é paralisado e salvo, para ser reativado no próximo estágio de filtragem. Os cenários que evoluem até o instante $T_{\max}$ sem terem atingido o limite de filtragem são descartados, e encerra-se o primeiro estágio de filtragem. Observa-se neste exemplo que duas partículas, das dez iniciais, atingem o limite de filtragem do Filtro 1. Portanto, tem-se $p_1 = 2/10$.

Entre o primeiro e o segundo estágio de filtragem, cada cenário é replicado um número de vezes suficiente para que se obtenha a quantidade inicial de dez partículas. No exemplo considerado, como os cenários têm pesos iguais, cada cenário será replicado 5 vezes, conforme ilustrado na Fig. 7-5. As posições iniciais dos cenários que são réplicas de um mesmo cenário estão sobrepostas.

Cada um dos dez cenários presentes no segundo estágio de filtragem segue então caminhos diferentes, possivelmente com ocorrência de falhas. A lógica de evolução e filtragem é a mesma aplicada no primeiro estágio de filtragem, com a diferença que os limites de filtragem são definidos agora pelo Filtro 2, e o Filtro 1 não é mais utilizado, conforme ilustrado na Fig. 7-6. Neste estágio, e também nos estágios posteriores, já existem condições nos cenários para a realização de manobras de resolução de conflito, definidas no modelo SDCPN. Caso esta manobra não ocorra, ou seja uma manobra ineficaz, os cenários atingem os limites do Filtro 2. Novamente, no exemplo, dois cenários atingem os limites de filtragem aplicados, do Filtro 2. Por isso, tem-se $p_2 = 2/10$. Estas partículas são novamente replicadas cinco vezes cada, e as réplicas evoluem no próximo estágio de filtragem. Este processo de evolução,

filtragem e replicação se repete até que a distância de filtragem seja equivalente às dimensões físicas da aeronave. Considerando as incertezas do modelo, o formato da aeronave acaba tendo pouca relevância e, por isso, o formato adotado é um paralelepípedo (as figuras representam apenas duas dimensões). Os instantes iniciais t_j^{1+} e t_l^{1+} dos cenários no segundo estágio de filtragem equivalem respectivamente aos instantes t_1^1 e t_2^1 de filtragem no primeiro estágio.

Fig. 7-5: Replicação de partículas após a aplicação do Filtro 1 do IPS.

Fig. 7-6: Segundo estágio de filtragem do IPS.

O processo completo de filtragem e replicação, desde os instantes iniciais, até a colisão, utilizando três estágios, é ilustrado na Fig. 7-7. Note que, no terceiro estágio de filtragem,

assim como no segundo, em muitos cenários as aeronaves desviam dos limites dos Filtros 2 e 3, e isto pode ocorrer devido às manobras de resolução de conflito executadas pelos pilotos. Apenas um dos cenários atinge o terceiro nível de filtragem e, neste caso, considera-se que houve colisão. Dessa forma, tem-se $p_3 = 1/10$.

Considerando que a probabilidade de se atingir um nível de filtragem não depende da probabilidade de se atingir um nível anterior e, aplicando as regras de probabilidade condicional, tem-se que a probabilidade de colisão é:

$$p = p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = \frac{2}{10} \cdot \frac{2}{10} \cdot \frac{1}{10} = 0,004$$

É importante notar que foi possível estimar uma probabilidade de colisão menor que o peso de um cenário, o que seria impossível sem as filtrações, com apenas um conjunto de dez cenários. Sem as filtrações e replicações, muito provavelmente o cenário inicial, que gerou o cenário de colisão, não teria atingido a distância de colisão.

O exemplo ilustrado, no entanto, tem várias simplificações, e assume que todos os cenários, no início de cada estágio de filtragem, são equiprováveis. Para que o IPS seja confiável, dois requisitos são necessários: por um lado, que ele seja matematicamente justificado e, por outro, que ele tenha meios de promover a diversidade de cenários ao longo de cada estágio de filtragem. A diversidade de características nos cenários é importante, sejam essas características as posições iniciais, no primeiro estágio de filtragem, ou as trajetórias e eventos evolutivos, em todos os estágios. O motivo dessa importância é que o espaço de estados híbridos onde se encontra o estado de cada cenário é muito grande, para qualquer nível de filtragem, e a amostra de cada nível deve ter representantes do maior número possível de regiões deste espaço. O Apêndice B descreve em detalhes o IPS e suas justificativas matemáticas.

Fig. 7-7: Processo total de filtragem em três estágios do IPS.

7.2 Estabelecimento dos Critérios de Filtragem do IPS a Serem Aplicados Neste Estudo de Caso

Para realizar as simulações com filtragens do IPS, foi preciso inicialmente estabelecer o número de filtros e os limites de cada um deles, de forma a obter uma boa relação entre precisão numérica e rapidez na execução do IPS. Não existe um processo formal de determinação dos critérios de filtragem para o IPS. Por meio de um processo empírico de tentativas sucessivas, chegou-se a uma combinação considerada satisfatória para o modelo em estudo.

Os dois primeiros filtros são preditivos, ou seja: são aplicados para uma previsão da situação futura da aeronave. Isto permite economizar um tempo considerável de simulação da evolução de cada cenário, que é a tarefa mais custosa para o computador. O primeiro filtro baseia-se no fato de que, no modelo SDCPN, a variação da posição lateral da aeronave em relação à trajetória, que é retilínea, é desprezível e, por isso, o erro ε_y da distância lateral entre a posição da aeronave e a linha de trajetória nominal, ilustrado na Fig. 7-8, é constante ao longo do tempo.

Fig. 7-8: Erro da posição lateral da aeronave em relação à trajetória nominal.

A diferença $\Delta\epsilon_y$ entre os erros da aeronave líder $\epsilon_{y,\text{lid}}$ e da aeronave seguidora $\epsilon_{y,\text{seg}}$ pode ser prevista para instantes avançados de tempo como 12 minutos. Caso o módulo dessa diferença seja maior que 50 metros (equivalentes a 0,027 NM), não haverá colisão.

Já o segundo filtro leva em conta a razão de aproximação/afastamento inicial entre as aeronaves. Se as velocidades das aeronaves líder e seguidora forem tais que inicialmente elas estão se afastando, ou se a diferença de velocidades iniciais for tal que a distância entre as aeronaves será maior que R_x^2 (distância R na direção x para o 2º estágio de filtragem) após 2 minutos de simulação, então o cenário é descartado. O parâmetro R_x^2 varia de acordo com o espaçamento inicial aplicado entre as aeronaves, representado pelo símbolo $t_{\text{spacing}}^{\text{default}}$. Este tempo é o tempo de separação que o controlador instrui a aeronave seguidora para manter atrás da aeronave líder, procurando que o piloto o faça por meio do Espaçamento ASAS. A Tabela 7-1 ilustra os parâmetros, para cada estágio de filtragem k :

- R_x^k : módulo da distância horizontal total entre a aeronave líder e aeronave seguidora, expressa em milhas náuticas (NM);
- $\Delta\epsilon_y^k$: módulo da diferença entre os erros de posicionamento lateral das aeronaves líder e seguidora, expressa em milhas náuticas (NM);
- Δh^k : diferença de altitude entre as aeronaves líder e seguidora, expressa em pés; e
- T_w : janela de previsão no tempo, considerando todos instantes entre o instante presente t e o instante futuro $t + T_w$, expresso em segundos.

Tabela 7-1: Critérios de filtragem aplicados no IPS.

Estágio	$t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{s}$				$t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45\text{s}, t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 30\text{s}$			
	R_x^k	$\Delta\epsilon_y^k$	Δh^k	T_w	R_x^k	$\Delta\epsilon_y^k$	Δh^k	T_w
k	NM	NM	pés	s	NM	NM	pés	s
1	∞	0,027	∞	720	∞	0,027	∞	720
2	4,700	0,027	∞	120	3,400	0,027	∞	120
3	3,200	0,027	900	0	3,200	0,027	900	0
4	2,500	0,027	900	0	2,500	0,027	900	0
5	1,600	0,027	900	0	1,600	0,027	900	0
6	0,800	0,027	900	0	0,800	0,027	900	0
7	0,400	0,027	500	0	0,400	0,027	500	0
8	0,200	0,027	250	0	0,200	0,027	250	0
9	0,100	0,027	200	0	0,100	0,027	200	0
10	0,070	0,027	100	0	0,070	0,027	100	0
11	0,027	0,027	50	0	0,027	0,027	50	0

De acordo com a Tabela 7-1, os valores de T_w são maiores que zero até o estágio $k=2$, e zero para os demais estágios. A razão disso é que, nos dois primeiros estágios de filtragem, é possível prever com antecedência o comportamento de um cenário, e tirar proveito disso para acelerar a simulação, antecipando os instantes de filtragem. Já para os estágios seguintes, os comportamentos dos cenários não são tão previsíveis, e não é possível antecipar os momentos de filtragem.

É possível verificar dois fatos implícitos na Tabela 7-1: o primeiro fato é que os critérios de filtragem em cada estágio k formam regiões convexas nas 4 dimensões de espaço e tempo, e o segundo fato é que a região delimitada pelos critérios de filtragem do estágio k contém a região delimitada pelos critérios de filtragem do estágio $k+1$. Estes dois fatos são necessários para o correto funcionamento do IPS. A escolha dos critérios de filtragem afeta a execução e os resultados das simulações de algumas maneiras, enunciadas abaixo.

- O tempo necessário para execução total do algoritmo cresce à medida que o número de estágios de filtragem aumenta. Os primeiros estágios de filtragem (com exceção do primeiro e do segundo, que são preditivos) são mais demorados, e o tempo de cada estágio vai diminuindo à medida que k aumenta, até atingir um tempo constante por estágio, o que aconteceu em torno de $k=6$ para o modelo implementado nesta tese;
- Caso o critério de filtragem seja muito forte, ou seja, caso a probabilidade p_k de um cenário passar para o estágio $k + 1$ de filtragem, estando no estágio k , seja muito pequena (menor que 0,01), haverá pouca diversidade de características entre os cenários no estágio $k + 1$, o que fará com que o IPS retorne um resultado pouco confiável;
- Para o modelo implementado nesta tese, foi preciso, de forma aproximada, dividir R_x^k por 2 a cada estágio de filtragem, a partir do quinto estágio, para garantir probabilidades de exclusão de cenários p_k com valores similares entre os diversos estágios; e
- Execuções experimentais do IPS mostraram que, para um número de estágios igual ou inferior a 10, havia uma considerável variação de resultados entre execuções do IPS. Com 11 níveis, acredita-se ter obtido uma boa relação entre precisão e tempo de execução do algoritmo. Esta constatação pode ser feita através do gráfico.

Fig. 7-9: Resultados de execuções do algoritmo IPS e evolução da média de seus valores.

7.3 Resultados Básicos da Simulação Monte Carlo

Um conjunto inicial de simulações Monte Carlo foi executado, utilizando como cenário as instâncias do modelo SDCPN apresentado nas seções 6.3 e 6.4. Este conjunto foi denominado conjunto-base, pois utilizou uma combinação de parâmetros julgada como a mais plausível no momento da conclusão da elaboração do modelo SDCPN (Capítulo 6). Essas simulações tiveram a aplicação dos filtros do IPS para obtenção das probabilidades de colisão entre aeronaves (que são iguais aos valores de risco da aplicação, denotados pelo símbolo $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}$) para alguns valores de espaçamento temporal requerido, que são exibidos na Fig. 7-10. Foi utilizado o algoritmo IPS conforme descrito no Apêndice B, o que permitiu executar as simulações em um tempo muito menor do que seria necessário para o método Monte Carlo básico. Entretanto, um tempo considerável de simulação ainda foi necessário, para garantir maior precisão nos resultados numéricos. Por causa disso, cada um dos pontos da curva da Fig. 7-10 necessitou de 10 execuções do algoritmo IPS, com 11 níveis de filtragem cada uma; uma única execução do IPS, utilizando 50 mil partículas, leva em torno de 5 horas num computador com dois processadores Intel Xeon de 64 bits, com *clock* de 3 GHz e utilizando 2.7 Giga- Bytes de memória principal. Dessa forma, o tempo total de computação para determinar os pontos da Fig. 7-10 foi de 150 horas (3 pontos $\times$ 10 execuções $\times$ 5 horas).

Fig. 7-10: Resultados do conjunto-base de simulações Monte Carlo.

No eixo horizontal da Fig. 7-10, estão diferentes valores para o tempo de separação $t_{\text{spacing}}^{\text{default}}$ requerido entre as aeronaves. Na abscissa do gráfico estão os valores do risco $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}$ obtidos pelas execuções do IPS. Por isso, o gráfico da Fig. 7-10 é o gráfico de $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}$ em função de $t_{\text{spacing}}^{\text{default}}$. A linha de valor constante 5×10^{-9} indicada como TLS (*Target Level of Safety*) é o nível-alvo de segurança recomendado pela OACI (ICAO, 1988; ICAO, 2001) para a separação longitudinal, que está sendo aplicada na operação analisada. Os valores de probabilidade de colisão obtidos neste conjunto-base de simulação permitiriam estimar que 47,5 s é o mínimo tempo de separação requerido para o qual a probabilidade de colisão fica abaixo do TLS. Contudo, o conjunto-base de simulação é apenas o ponto de partida para uma análise mais refinada das probabilidades de colisão, e não deve ser interpretado isoladamente.

7.4 Avaliação de Tendência e Incerteza

Esta fase da análise é necessária porque o modelo de simulação é diferente da aplicação real, devido aos seguintes fatos:

- A simulação exige que sejam feitas aproximações numéricas, tanto para as distribuições de probabilidades, como para métodos de integração e funções matemáticas; como exemplo da existência deste fato, a altitude de entrada das aeronaves no setor segue uma distribuição uniforme dentro de uma determinada faixa de valores; os valores desta distribuição são gerados por algoritmos pseudo-aleatórios;

- ii) São feitas hipóteses sobre valores de parâmetros no modelo SDCPN; exemplos destas hipóteses são a determinação das taxas de falhas de equipamentos e os tempos gastos pelos operadores humanos na realização de determinadas tarefas;
- iii) São feitas hipóteses sobre a estrutura do modelo SDCPN; exemplos destas hipóteses são a desconsideração de efeitos de esteira de turbulência das aeronaves e a ausência de filtros de ruídos espúrios na instrumentação da aeronave;
- iv) Existem perigos que não são cobertos na modelagem SDCPN; para exemplificar, menciona-se o encontro de uma aeronave com a esteira de turbulência da aeronave que segue à sua frente; e
- v) São feitas hipóteses sobre o conceito operacional da aplicação, pois ela ainda não é uma prática estabelecida de tráfego aéreo; por exemplo, assume-se que o perfil vertical da trajetória da aeronave apresenta alguns trechos de descida alternados com “patamares” de altitude constante.

Estes fatores causam uma diferença entre o resultado numérico obtido nas simulações Monte Carlo e o valor de probabilidade de colisão que existirá na aplicação real. Esta diferença é expressa em dois aspectos distintos: um é denominado de incerteza, e define-se como um intervalo I de valores no qual se assume que o valor da probabilidade real de colisão pode estar, com um índice de confiança de 95% (incerteza “inicial”); o outro aspecto é denominado de tendência (*bias*), e consiste em um fator multiplicativo B_I que incide sobre os extremos do intervalo de incerteza e um fator multiplicativo B_R sobre o centro deste intervalo. A Fig. 7-11 ilustra estes conceitos em um exemplo gráfico. Nela, observam-se duas faixas de incerteza: uma inicial (I), em torno do valor obtido na simulação, e outra corrigida, em torno do valor real de probabilidade. A faixa de incerteza corrigida sofre influência do comprimento da faixa de incerteza original e do fator de correção B_I . A maneira como se definem e calculam a faixa de incerteza inicial, e os fatores B_I e B_R , segue o método de Everdij e Blom (2002). Este método é adotado para o processo de avaliação de tendência e incerteza da aplicação de Espaço Temporal Aerotransportado desta tese.

Fig. 7-11: Ilustração dos conceitos de tendência e incerteza.

Para exemplificar a aplicação dos conceitos de tendência e incerteza ilustrados na Fig. 7-11, pode-se supor, hipoteticamente, que o modelo que está sendo simulado é a cobrança de pênalti em um jogo de futebol. O modelo inclui o jogador que cobra o pênalti, o formato da trave, o goleiro, a bola e a superfície do campo. A probabilidade de que o pênalti resulte em um gol, obtido com a simulação Monte Carlo deste modelo, resultou em 0,6. Entretanto, havia incerteza quanto à habilidade do jogador e do goleiro e, por isso, a faixa de incerteza da probabilidade está entre 0,5 e 0,7. Além disso, constatou-se, em observações práticas, que o efeito emocional da torcida é positivo para o jogador que está cobrando o pênalti, aumentando em 20% a probabilidade de sucesso do pênalti. No exemplo hipotético, não foi possível incluir um modelo matemático que possibilite simulação do efeito emocional da torcida no jogador e no goleiro e, por isso, foi preciso incorporar um fator de tendência de 1,2 (100%+20%) sobre a probabilidade obtida pela simulação, resultando no valor esperado de 0,72 para o sucesso do pênalti. Supondo ainda que, neste exemplo hipotético, $B_I = B_R$, a faixa de incerteza corrigida é determinada pelos limites 0,6 e 0,84.

Resultado da Avaliação de Tendência e Incerteza

A composição gráfica dos resultados obtidos na avaliação de tendência e incerteza descrita em detalhe no Apêndice C é apresentada na Fig. 7-12. Esta figura mostra que existe um grau de confiança de 95% de que o risco $\mathfrak{R}_{60}$ da aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado esteja abaixo do TLS, quando o espaçamento requerido entre aeronaves é 60 s, pois o TLS está fora do intervalo de confiança $I_{95\%,60}$. Por outro lado, quando o espaçamento requerido entre aeronaves é de 45 s, existe a possibilidade de que o risco $\mathfrak{R}_{45}$ esteja abaixo do TLS mas, não obstante, existe também a possibilidade de que $\mathfrak{R}_{45}$ esteja acima do TLS.

Fig. 7-12: Representação gráfica dos intervalos de confiança obtidos na avaliação de tendência e incerteza.

7.5 Considerações Finais do Capítulo

Para realizar o cálculo do risco e sua avaliação de tendência e incerteza, apresentados neste capítulo, foi necessário um enorme tempo de simulação, principalmente para a obtenção dos resultados da seção 7.4. Para obter a sensibilidade de cada parâmetro analisado, foi necessário executar no mínimo 10 vezes o algoritmo IPS, devido à obtenção de uma precisão minimamente confiável. Como foram incluídos 23 parâmetros para $t_{spacing}^{default} = 60$ s e 22 parâmetros para $t_{spacing}^{default} = 45$ s, isto resultou em 450 simulações, cada uma consumindo em torno de 5 horas de computação.

Na tentativa de se obter uma precisão maior no algoritmo IPS, foi implementada uma versão avançada do mesmo, denominado IPS Avançado, que força a ocorrência de falhas em equipamentos, fazendo uma ponderação especial para os cenários, dependendo do estado de falha de cada um; foram executadas dezenas de simulações com o IPS Avançado, mas os resultados não foram considerados neste trabalho, por não apresentarem um ganho de precisão em relação ao IPS básico. Até o presente momento, não foi possível detectar a causa da falta de precisão obtida nos valores de risco calculados pelo IPS (diferenças de valores obtidos para cada uma das 10 execuções do algoritmo IPS), tendo em conta que o ambiente de simulação não está subdimensionado (o número de partículas utilizado por execução, 50 mil, é maior do

que o número de partículas utilizado em outras aplicações do IPS realizadas no NLR, e está próximo do limite permitido pela memória dos computadores disponíveis para este trabalho de pesquisa, de 4 GB), mas acredita-se que esta falta de precisão seja intrínseca à complexidade do modelo.

Acredita-se também que o tempo de computação poderia ainda ter sido diminuído pela metade pelo uso de uma linguagem de programação mais eficiente (C, C++ ou Delphi). Contudo, outros fatores acabaram justificando, ao menos em parte, o tempo adicional gasto em simulação. Tais fatores são:

- O ambiente de desenvolvimento Delphi apresenta um custo para obtenção de licença e, além disso, seu compilador não permite uso de memória acima de 2GB.
- A linguagem Java apresenta vantagens em relação ao C e ao C++ no que se refere a estruturas de dados e respectivas rotinas de manipulação, e também à disponibilidade de rotinas nativas prontas para comunicação inter-processos e transmissão de objetos, o que facilitou consideravelmente a filtragem e manipulação de partículas, bem como a paralelização do processamento das partículas; resumindo, o Java apresenta uma maior facilidade de desenvolvimento que o C e o C++.
- No início do desenvolvimento desse software, já existiam prontas classes básicas de simulação de redes de Petri, desenvolvidas em Java por especialistas no assunto, inicialmente por Alexander Gruenwald (GRUENWALD, 2001) e Peter Hoogers*, que adicionou módulos ao código de Gruenwald para permitir comportamentos de SDCPN.

Ponderando, nesta etapa final do trabalho de pesquisa, estes fatores em relação à perda de desempenho apresentada pelo Java, pode se afirmar que teria sido mais adequado, nesta tese, ter desenvolvido o software de simulação na linguagem C++ (que torna a orientação a objeto mais fácil do que em C); por outro lado, isso teria sido mais arriscado. Somente após adquirir um conhecimento básico de simulação de redes de Petri, o que foi possibilitado após os primeiros testes do modelo SDCPN implementado em Java, tornou-se possível reescrever as classes básicas de Gruenwald e Hoogers na linguagem C ou C++. Entretanto, naquela altura do desenvolvimento desta análise de risco, a maior parte do software já tinha sido feita em Java, assim, a maior parte do trabalho de desenvolvimento seria desperdiçada.

* Para ter uma referência sobre o trabalho de Peter Hoogers, ainda que não diretamente relacionado com o software utilizado nesta tese, segue como sugestão (HOOGERS, KLEIN, THIAGARAJAN, 1996).

Conseqüentemente, optou-se por assumir os potenciais problemas de desempenho do ambiente Java.

Assumindo as faixas de incerteza do risco obtidas neste Capítulo, resta ainda tentar obter informações sobre as causas de colisões de aeronaves, dentro das hipóteses assumidas no modelo. Isto é apresentado no Capítulo 8.

8 Análise das Possíveis Causas de Colisão Encontradas nas Simulações

Este capítulo apresenta uma análise sobre as possíveis causas das colisões entre aeronaves encontradas nas simulações Monte Carlo apresentadas no Capítulo 7.

A ocorrência de uma colisão entre aeronaves, em geral, é causada por uma combinação de diversos fatores. Para proporcionar indícios desses fatores nas simulações Monte Carlo realizadas, o software de simulação armazenou alguns dados sobre o histórico de cada cenário. Os dados analisados neste Capítulo se referem somente aos cenários em que ocorreu colisão, e são eles:

- Velocidades inicial e final das aeronaves;
- Instante de colisão;
- Altitudes inicial e final das aeronaves;
- Número de aeronaves que receberam instrução para realizar Espaçamento Aerotransportado;
- Número de aeronaves que estavam realizando, no momento da colisão, o Espaçamento Aerotransportado;
- Número de aeronaves que chegaram a realizar, em algum momento, o Espaçamento Aerotransportado;
- Número de aeronaves que receberam instrução de desvio de rota; e
- Número de aeronaves que fizeram desvio de rota antes de colidir.

As próximas seções apresentam análises destes dados. A amostra utilizada, para o caso onde o espaçamento requerido entre aeronaves ($t_{\text{spacing}}^{\text{default}}$) é de 60 segundos, foi de 20.000 cenários, cada um deles com uma colisão. Da mesma forma, para o caso onde o espaçamento requerido é de 45 segundos, a amostra é composta de 20.000 cenários com ocorrência de colisão.

8.1 Análise das Velocidades, Altitudes e Instantes de Colisão das Aeronaves

Foram registradas as velocidades iniciais e finais das aeronaves líder e seguidora, no instante em que a aeronave líder entra no setor de aproximação. A velocidade e a altitude das aeronaves estão sujeitas a variações causadas pela presença de ruídos eletromagnéticos e defeitos nos componentes eletrônicos, no sistema de sensores e processamento dos dados dos sensores, que por sua vez está inserido em uma malha fechada de controle de altitude, velocidade e direção. Como a velocidade e a altitude da aeronave são controladas em função da velocidade e da altitude medidas (vide seção 6.3.2.2), o sistema de controle tenta compensar estes ruídos e defeitos atuando na potência dos motores e no ângulo de ataque da aeronave. Em situações comuns, os efeitos destes ruídos e defeitos são praticamente imperceptíveis. Entretanto, no modelo SDCPN, os ruídos são definidos por processos de Wiener (vide seções 6.2, 6.3.2.2 desta tese e seção F.4 de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006)) que, com probabilidades bastante pequenas, mas não nulas, podem atingir valores extremos, os quais podem causar aproximação perigosa de aeronaves que estão seguindo a mesma rota. As próximas seções apresentam gráficos com as distribuições das velocidades, altitudes e instantes de colisão entre aeronaves líder e seguidora, obtidas por intermédio das simulações descritas no Capítulo 7.

8.1.1 Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 60 s

A Fig. 8-1 apresenta os histogramas das velocidades iniciais e finais da aeronave líder e da aeronave seguidora, e também as diferenças iniciais e finais entre as duas aeronaves. O instante inicial é o instante em que a aeronave líder entra no setor de espaço aéreo em estudo. Se houver uma diferença de velocidade positiva entre seguidora e líder, neste instante ou nos instantes subseqüentes, isto significa que as aeronaves estão se aproximando.

Em todos os histogramas dessas duas figuras, não parece possível encontrar uma distribuição probabilística padrão que se ajuste aos dados encontrados. A grande concentração de cenários em alguns valores de velocidade deve-se, em parte, às replicações de partículas feitas no IPS após cada filtro aplicado.

Fig. 8-1: Histogramas de velocidades iniciais e finais das aeronaves, para $t_{spacing}^{default} = 60s$.

Observam-se duas zonas de concentração para as velocidades da aeronave líder, tanto para as velocidades iniciais como para as velocidades finais. A primeira zona de concentração para as velocidades finais, em torno de 220 nós, está correlacionada a uma maior proximidade do aeroporto de destino, de acordo com as definições do modelo SDCPN. Observa-se que não

ocorreram casos com menos de 18 nós de diferença inicial $\Delta_v(0)$. Já para diferença de velocidade final $\Delta_v(t_f)$, observa-se uma média de 42,8 nós. Além disso, a média observada para $v_{seg}(t_f)$ foi de 312,5 nós. Tais valores não indicam situações improváveis. Entretanto, o modelo é feito de tal forma que o agente ATCo procura evitar que a aeronave seguidora se aproxime perigosamente da aeronave líder. A velocidade média das aeronaves seguidoras baixou do instante inicial para o instante final. Inicialmente, ao entrar no setor, a média de velocidade foi de 327,4 nós, com desvio padrão de 5,0 nós; nos instantes de colisão, a média de velocidade foi de 312,5 nós, com desvio padrão de 31,3 nós; isto indica, por um lado, que foram executadas ações para diminuir a velocidade da aeronave seguidora e, por outro lado, que, ou essas ações foram tardias, ou foram omitidas com certa frequência. Resta apurar quais foram os eventos que impediram que o ATCo e/ou o piloto operador executassem as ações necessárias para resolver o conflito entre as aeronaves. Esta apuração é realizada na seção 8.3.

A Fig. 8-2 apresenta os histogramas das altitudes das aeronaves nos instantes de colisão. Como existe uma pequena diferença entre a altitude da aeronave líder e a altitude da aeronave seguidora no instante da colisão, $h_{col}(t_f)$ é o valor médio das duas, e $\Delta_h(t_f)$, a diferença entre as duas. Uma diferença positiva significa que a aeronave seguidora está acima da aeronave líder, e uma diferença negativa significa o contrário.

Observam-se duas regiões de concentração de colisões na Fig. 8-2: uma em torno de 9.500 pés, e outra em torno de 7.000 pés. A primeira região concentra cenários em que a colisão ocorreu em instantes de tempo menores, pois as aeronaves não chegaram a sair da altitude inicial, que está distribuída entre 9.000 10.000 pés; a segunda região concentra cenários em que a colisão ocorreu em instantes de tempo posteriores aos do primeiro grupo, pois as aeronaves já estavam mais próximas do aeroporto, o que explica suas altitudes mais baixas.

Também se notam pequenos grupos de ocorrências de colisão em torno de 5.000 e 2.500 pés, que indicam situações de proximidade ainda maior do aeroporto de destino. Não se sabe a causa desta concentração múltipla, mas a investigação desta causa poderia oferecer alguma idéia para a melhoria do nível de risco do Espaçamento Temporal Aerotransportado, o que poderia ser feito em futuros trabalhos de pesquisa.

A diferença de altitudes finais $\Delta_h(t_f)$ tem uma distribuição aproximadamente uniforme entre -50 e 50 pés. Estes valores se devem ao último estágio de filtragem IPS, que descarta os cenários que tenham $\Delta_h(t_f)$ fora destes limites, e considera que, se $\Delta_h(t_f)$ estiver dentro

destes limites e, ao mesmo tempo, houver uma diferença muito pequena no plano horizontal, as aeronaves colidiram. Estes limites excedem as dimensões físicas das aeronaves consideradas mas, no entanto, garantem uma margem pessimista para o cálculo do risco (em favor da segurança).

Fig. 8-2: Histogramas de altitudes finais das aeronaves, para $t_{spacing}^{default} = 60$ s.

Para estabelecer uma correlação entre as distribuições das velocidades e das altitudes de colisão, foi elaborada a Fig. 8-3. Nela observa-se uma situação anormal para a dinâmica de operação de aproximação do aeroporto definida no modelo SDCPN. O procedimento nominal do modelo é que, quando a aeronave receba a instrução para descer de 9.000 para 7.500 pés, ela também seja instruída para diminuir a velocidade para 250 nós. Ao contrário, o que se nota na Fig. 8-3 é que as aeronaves que estão a 7.500 pés têm velocidade em torno de 320 nós, indicando que a instrução de velocidade do ATCo não foi dada ou não foi cumprida. De qualquer forma, a descida das aeronaves de 9.000 para 7.500 pés pode contribuir para que a velocidade da aeronave seguidora fique acima de uma velocidade adequada para o espaçamento seguro em relação à aeronave líder.

Fig. 8-3: Histograma conjunto das velocidades e altitudes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

Outras figuras que permitem uma melhor compreensão dos casos de colisão são apresentadas adiante. Na Fig. 8-4, apresenta-se a distribuição dos instantes de colisão, expressos em minutos a partir da entrada da aeronave líder no setor; os instantes de colisão têm uma distribuição cuja média é de 8 minutos e 50 segundos.

Nas figuras 8-5, 8-6 e 8-7, apresentam-se as distribuições das velocidades das aeronaves, em conjunto com os instantes de colisão, respectivamente para a aeronave líder, a aeronave seguidora e para a velocidade relativa entre as duas.

Considerando as dispersões de velocidades da Fig. 8-6, ao longo dos instantes de colisão, a concentração de velocidades finais da aeronave seguidora em torno de 320 nós é mais distribuída ao longo do tempo do que ao longo das altitudes (concentradas em torno de 7.500 pés, conforme a Fig. 8-3), observando-se duas regiões de concentração do instante de colisão t_f , uma em torno de 8 minutos e meio e outra em torno de 10 minutos. Contudo, devido à grande concentração observada na Fig. 8-3, acredita-se que ambas grandes regiões de concentração da Fig. 8-6 contenham cenários de colisão ocorrida em torno de 7.500 pés de altitude.

Fig. 8-4: Histograma dos instantes de colisão, em minutos, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

Fig. 8-5: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave líder com os instantes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

Fig. 8-6: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave seguidora com os instantes de colisão, para $t_{spacing}^{default} = 60$ s.

Fig. 8-7: Distribuição conjunta da velocidade relativa entre aeronaves seguidora e líder com os instantes de colisão, para $t_{spacing}^{default} = 60$ s.

Para concluir esta seção, é importante observar que, com os dados apresentados até este ponto do texto, não é possível saber qual proporção dos cenários analisados na amostra desta seção chegou a executar o espaçamento por meio do ASAS pois, de acordo com o modelo SDCPN, eventualmente o ASAS pode não ser devidamente ativado. Também não é possível saber se as aeronaves estavam executando este procedimento no instante da colisão. Em diversas situações as aeronaves podem continuar o procedimento de aproximação sem utilização do Espaçamento Temporal proporcionado pelo ASAS. Na seção 8.2 estas informações são levantadas.

8.1.2 *Análise dos Casos de Espaçamento Requerido Igual a 45 s*

Esta seção faz uma análise similar à da seção anterior, mas para os cenários em que $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s. As distribuições apresentam algumas diferenças em relação às distribuições apresentadas para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

A figura Fig. 8-8 ilustra as velocidades iniciais e finais das aeronaves. As velocidades iniciais apresentam distribuições até certo ponto regulares e pouco dispersas: a média de $v_{\text{lid}}(0)$ é 301,4 nós, e seu desvio padrão é 4,7 nós; a média de $v_{\text{seg}}(0)$ é 325,3 nós, e seu desvio padrão é 4,8 nós; já para a diferença $\Delta_v(0)$, tem-se média 23,8 nós, e desvio padrão 3,3 nós (valores bastante próximos dos encontrados para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s). As velocidades finais são consideravelmente mais dispersas, com média 289,3 nós e desvio padrão de 23,3 nós para $v_{\text{lid}}(t_f)$, e média de 327,5 nós e desvio padrão 23,9 nós para $v_{\text{seg}}(t_f)$.

A diferença $\Delta_v(t_f)$ apresenta distribuição assimétrica com concentração à direita, com média 38,2 nós e desvio padrão 34,3 nós. Nota-se um aumento médio de 14,4 nós em Δ_v entre o instante em que a aeronave líder entra no setor e o instante em que ocorre a colisão. Acredita-se que este aumento seja causado por erros no sistema de instrumentação da aeronave, possivelmente combinados com transitórios positivos na velocidade que ocorrem ao se iniciar descidas de altitude. Seja qual for a origem do aumento, os agentes humanos não foram eficazes para resolver o problema, o que seria feito por meio de diminuir a velocidade das aeronaves seguidoras. As razões do aumento de Δ_v podem ser esclarecidas pela análise das altitudes das aeronaves e dos instantes de colisão.

Fig. 8-8: Histogramas de velocidades iniciais e finais das aeronaves, para $t_{spacing}^{default} = 45$ s.

Não obstante a tendência de aumento de Δ_v , observa-se um número considerável de ocorrências de $\Delta_v(t_f)$ em torno de -50 nós, indicando o fato inusitado que a aeronave líder estava voando mais rapidamente que a aeronave seguidora no instante da colisão. Isto só pode ocorrer caso a aeronave seguidora tenha “ultrapassado” a aeronave líder por cima ou por baixo e, posteriormente, as velocidades e altitudes tenham mudado, causando a colisão.

A Fig. 8-9 apresenta as altitudes das aeronaves nos instantes de colisão. Diferentemente do que se nota para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s, as altitudes de colisão coincidem predominantemente com as altitudes de entrada no setor, entre 9.000 e 10.000 pés, indicando que as colisões ocorrem em instantes em que a aeronave ainda está longe do aeroporto de destino. Existe uma zona menor de concentração em torno de 7.500 pés, que corresponde a posições um pouco mais próximas do aeroporto de destino. A distribuição das diferenças de altitude entre seguidora e líder é aproximadamente uniforme.

Fig. 8-9: Histogramas de altitudes finais das aeronaves, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.

Para correlacionar a velocidade com a altitude de colisão, foi elaborada a Fig. 8-10. Nela, observa-se que os casos mais frequentes são aqueles em que nem a velocidade nem a altitude foram diminuídas e, sendo assim, a tendência de aceleração da aeronave seguidora não se deve às descidas de altitude. Sendo assim, a única razão, dentro do modelo SDCPN, que explica o aumento de velocidade, são os erros de instrumentação da aeronave.

A próxima distribuição de interesse é a dos instantes de colisão t_f , apresentada na Fig. 8-11. Com exceção para a concentração de valores observada próxima aos 9 minutos e meio, o formato desta distribuição assemelha-se a algumas distribuições padrão, como a distribuição lognormal, a de Rayleigh, ou a distribuição gama, cujas densidades crescem abruptamente nos valores menores da variável aleatória, e decrescem suavemente, em uma longa cauda que se estende para os valores maiores da variável aleatória. A média (aritmética) dos valores de t_f da amostra é de 6 minutos e 6 segundos, e o desvio padrão é de 1 minuto e 24 segundos. Notam-se cenários onde a colisão ocorreu em instantes mais avançados, próximos a 9 minutos e meio, significando que as aeronaves estavam mais próximas do fixo de aproximação final (FAF).

Fig. 8-10: Histograma conjunto das velocidades e altitudes de colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.

Fig. 8-11: Histograma dos instantes de colisão, em minutos, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.

Na Fig. 8-12, apresenta-se a distribuição da velocidade da aeronave líder em conjunto com os instantes de colisão t_f e, na Fig. 8-13, a distribuição conjunta da velocidade da aeronave seguidora em conjunto com t_f . De forma diferente dos casos onde $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s, observa-se uma dispersão bem maior para as velocidades das aeronaves seguidoras, $v_{\text{seg}}(t_f)$, do que a dispersão de $v_{\text{lid}}(t_f)$. Comparando essas duas figuras com a Fig. 8-14, fica ainda mais evidente que a dispersão de $\Delta_v(t_f)$ está fortemente correlacionada com a dispersão de

$v_{seg}(t_f)$, deixando $v_{lid}(t_f)$ como aspecto secundário. Sendo assim e, considerando aumento médio de $\Delta_v(t)$ entre os instantes inicial e final, a maior parte dos casos de colisão, com $t_{spacing}^{default} = 45$ s, está correlacionada com erros de instrumentação da aeronave seguidora. Resta saber se estes erros estão ou não correlacionados ao uso do ASAS. Isto pode ser avaliado com as informações apresentadas na seção 8.2.

Fig. 8-12: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave líder com os instantes de colisão, para $t_{spacing}^{default} = 45$ s.

Poderia se esperar que a diferença média de velocidade de colisão $\Delta_v(t_f)$ fosse maior para $t_{spacing}^{default} = 60$ s do que para $t_{spacing}^{default} = 45$ s, porque, sendo o tempo médio de separação entre aeronaves maior, conseqüentemente a diferença de velocidade entre aeronaves, para anular este tempo, seria maior. Entretanto, pelo fato de o espaçamento entre as aeronaves ser menor quando $t_{spacing}^{default} = 45$ s, há menos tempo para o controlador tomar as providências necessárias para evitar colisão; quando $t_{spacing}^{default} = 60$ s, os casos onde a diferença de velocidade entre aeronaves é muito alta são resolvidos pelo ATCo com maior facilidade.

Fig. 8-13: Distribuição conjunta da velocidade da aeronave seguidora com os instantes de colisão, para $t_{spacing}^{default} = 45$ s.

Fig. 8-14: Distribuição conjunta da velocidade relativa entre aeronaves seguidora e líder com os instantes de colisão, para $t_{spacing}^{default} = 45$ s.

8.2 Análise de Execução do Procedimento de Espaçamento Temporal Aerotransportado

Esta seção apresenta informações sobre a execução do procedimento da operação ‘Permanecer em Trilha’ por meio do ASAS, visando encontrar possíveis correlações entre este procedimento e os casos de colisão. As amostras são de 500.000 cenários, utilizados no IPS, para cada valor de $t_{\text{spacing}}^{\text{default}}$. Essas amostras contêm as amostras menores (que incluem somente cenários em que ocorreu uma colisão) utilizadas na seção 8.1.

8.2.1 Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 60 s

Inicialmente são apresentadas informações sobre a utilização do ASAS para se realizar Espaçamento Temporal Aerotransportado. Estas informações são apresentadas em função das distâncias para as quais os filtros de partículas (cada partícula é um cenário) do IPS são aplicados. A Fig. 8-15 representa essas distâncias e as porcentagens registradas sobre o estado do procedimento de Espaçamento Temporal Aerotransportado. A primeira série de porcentagens, indicada com quadrados, refere-se à porcentagem de cenários em que as aeronaves seguidoras foram instruídas para realizar a operação ‘Permanecer em Trilha’ utilizando o ASAS. As distâncias, no eixo das ordenadas, indicam a aproximação progressiva entre a aeronave líder e a seguidora, e estão artificialmente assinaladas com sinal negativo, para facilitar a compreensão da sucessão de eventos, que vai da esquerda para a direita. Por exemplo, a primeira filtragem, à esquerda, ocorre para aeronaves seguidoras que chegaram a menos de 3,2 NM da aeronave líder. Para esta filtragem, o valor observado para a primeira série de dados é de 26%, indicando que, para todas as aeronaves seguidoras inicialmente geradas, esta é a porcentagem das aeronaves que foram instruídas para iniciar o espaçamento por meio do ASAS antes que primeira a filtragem fosse aplicada. A segunda série de dados, indicada com círculos, refere-se à porcentagem de cenários nos quais as aeronaves seguidoras iniciaram o espaçamento ASAS antes de atingir a distância de filtragem, enquanto que a terceira série de dados, indicada com triângulos, refere-se à porcentagem de cenários em que as aeronaves seguidoras mantiveram o espaçamento por meio do ASAS durante a filtragem. Tomando como exemplo a filtragem de 3,2 NM, é possível verificar na ampliação da Fig. 8-16 que o valor para a segunda e a terceira série é de menos de 1%.

Fig. 8-15: Utilização do ASAS para o espaçamento temporal entre aeronaves, considerando $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

Fig. 8-16: Ampliação gráfica de duas séries da Fig. 8-16.

Pela primeira série de dados (quadrados), nota-se que as aeronaves seguidoras que passam pelos diversos níveis de filtragem têm uma tendência a não terem sido instruídas espaçamento por meio do ASAS. Ademais, pela segunda e pela terceira série de dados, nota-se que, no momento da filtragem, a maioria não iniciou (círculos) ou não manteve (triângulos) o espaçamento por meio do ASAS. Estas constatações são fortes indícios de que as aeronaves que iniciam e mantêm o espaçamento por meio do ASAS não passam pelas filtrações (que deixam passar somente os casos de aproximação potencialmente perigosos); isto significa dizer que o espaçamento ASAS contribui positivamente para manter um espaçamento seguro entre aeronaves.

Ainda analisando as figuras 8-15 e 8-16, nota-se um pequeno aumento da porcentagem de aeronaves que iniciaram o espaçamento por meio do ASAS antes das filtrações de 1,6 NM e 0,8 NM. Isto pode ser explicado devido a iniciativas tardias de início de espaçamento.

Dadas essas constatações, é desejável saber por que as aeronaves seguidoras não foram instruídas para realizar o espaçamento ASAS. É importante observar que o ATCo pode, de forma segura, omitir a transmissão das instruções de espaçamento. Isto ocorre em dois casos: no primeiro, a velocidade da aeronave seguidora, quando esta entra no setor, é muito maior que a da aeronave líder (excedendo em mais de 15%) e, por isso, é mais conveniente que o ATCo transmita uma instrução de desvio de rota da aeronave seguidora; no segundo caso, que é mais raro, de acordo com o modelo, a distância entre aeronaves fica rapidamente menor que 3,2 NM, antes que o ATCo tenha tempo de transmitir as instruções de espaçamento.

Outra observação importante é que, independentemente da transmissão das instruções de espaçamento, caso o ATCo detecte conflito entre aeronaves (definido, no modelo, como o caso em que a distância entre aeronaves é menor que 3,2 NM), ele irá transmitir instruções de desvio de rota da aeronave seguidora, para resolver o conflito. Neste caso, o espaçamento ASAS será interrompido na aeronave seguidora. De qualquer forma, faz-se conveniente analisar o quão efetiva é a ação do ATCo para resolver conflitos. Esta análise é realizada na seção 8.3.

8.2.2 Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 45 s

Uma análise similar à apresentada na seção anterior pode ser feita para os casos onde $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45 \text{ s}$, começando pela utilização do ASAS, apresentada na Fig. 8-17. As porcentagens de iniciação e continuação do espaçamento ASAS para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45 \text{ s}$ são, de acordo com a

Fig. 8-17, significativamente maiores que para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s. Acredita-se que isso ocorre porque os cenários que atingem os primeiros estágios de filtragem são cenários em uma situação mais próxima da situação considerada “normal” (espaçamento próximo do valor pré-estabelecido, 45 s ou 60 s) para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s, do que uma situação que seria considerada “normal” para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s. Contudo, essas porcentagens ainda são pequenas, ficando em torno de 5%, próximo à colisão. Por outro lado, nota-se que a porcentagem de aeronaves instruídas para iniciar o procedimento cai abruptamente logo no segundo estágio de filtragem, indicando que, nestes casos, ou o ATCo se omitiu, por causa de um atraso excessivo, ou então ele julgou mais seguro não iniciar o procedimento, para tentar realizar uma manobra de resolução de conflito.

Fig. 8-17: Utilização do ASAS para o espaçamento temporal entre aeronaves, considerando

$$t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45 \text{ s.}$$

O motivo de o ATCo ter optado por não instruir a aeronave seguidora para realizar o espaçamento ASAS pode ser uma diferença inicial muito grande entre as velocidades do par de aeronaves líder-seguidora.

É importante observar que apenas 2,5% (aproximadamente) das aeronaves que colidiram estavam realizando o espaçamento temporal por meio do ASAS no momento da colisão. Isto

parece indicar que não há uma correlação significativa do uso do ASAS com a ocorrência de colisão.

8.3 Análise de Ações de Detecção e Resolução de Conflito

De acordo com o modelo SDCPN para a operação ‘Permanecer em Trilha’ ASAS, a detecção de conflito entre aeronaves é feita pelo ATCo, que o faz por meio da observação das trilhas das aeronaves na tela radar e, quando ele percebe que as aeronaves se aproximaram uma da outra a menos de 3,2 NM, procura transmitir uma instrução para a aeronave seguidora desviar da rota, a fim de aumentar a distância entre as aeronaves. Nota-se que o limiar de detecção de conflito coincide com a distância entre a aeronave líder e a aeronave seguidora utilizada no primeiro nível de filtragem. O recebimento desta instrução está condicionado ao correto funcionamento do transmissor de rádio do ATC, em solo, e do receptor na aeronave. Uma vez que a instrução é recebida pelo piloto operador, na aeronave, ele irá colocar o desvio de rota como meta prioritária, e procurará fazê-lo o mais rapidamente possível. Entretanto, podem ocorrer atrasos em todo este ciclo, principalmente na execução das tarefas do ATCo e do piloto operador (vide seções 3.5 e 3.7.2). As subseções seguintes apresentam informações numéricas sobre estas tarefas.

8.3.1 Análise dos Casos de Espaçamento Requerido Igual a 60 s

O primeiro gráfico a ser analisado nesta subseção, presente na Fig. 8-18, diz respeito ao recebimento na aeronave de instruções de desvio emitidas pelo ATCo, e à execução dos desvios instruídos. Observa-se que, até a filtragem de 3,2 NM, apenas uma porcentagem muito pequena (menos de 1%) de aeronaves seguidoras recebeu instrução de desvio de rota para resolução de conflito, pois a distância de limiar de conflito coincide com a distância do primeiro estágio de filtragem ilustrado. Já na filtragem de 2,5 NM, uma grande porcentagem de aeronaves recebeu instrução de desvio de rota e, dentro desta porcentagem, a maioria iniciou esta manobra. Estas porcentagens, nas próximas filtrações, oscilam ligeiramente até a filtragem de 0,4 NM, subindo então, sucessivamente, até 87% para as distâncias finais de filtragem. Dessa forma, há fortes indícios de que o ATCo está atuante, uma vez que, conforme as aeronaves se aproximam, mais aeronaves recebem instrução para desviar a rota para evitar conflito (e, conseqüentemente, a colisão). Por outro lado, é de se admirar que, uma vez que a maioria das aeronaves recebe de fato as instruções do ATCo e as execute, uma considerável parte delas passe para os níveis seguintes de filtragem. Isto pode ser devido a atrasos no

recebimento das instruções de resolução de conflito e, sendo assim, quando a aeronave seguidora inicia a curva, ela já está próxima demais da aeronave líder, resultando em manobra de desvio ineficaz (vide seções 3.5 e 3.7.2).

Fig. 8-18: Recebimento de instruções e execução de resolução de conflito nas aeronaves seguidoras, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

A Fig. 8-19 fornece informações que permitem constatar a ocorrência destes atrasos. Ela apresenta as distâncias médias entre aeronaves, conhecidas pelo ATCo, no momento em que ele detecta conflito. Nela se observa uma diminuição progressiva das distâncias detectadas pelo ATCo, conforme se avança nos estágios de filtragem. Uma interpretação para isso é a seguinte: os cenários que passam pelas filtragens são aqueles em que o ATCo detectou conflito com atraso, em um momento em que as aeronaves já estão próximas demais. Dada a constatação que, em grande parte dos cenários analisados, houve uma descida de 9.000 para 7.500 pés, aproximadamente, é possível que o atraso na detecção de conflito tenha sido causado pela diferença de altitude entre as aeronaves líder e seguidora: o ATCo só detecta conflito caso as aeronaves estejam a menos de 900 pés distantes verticalmente. E ainda outro fator que contribui para o atraso na detecção de conflito são as distribuições probabilísticas dos tempos de ação do ATCo, definidas no modelo SDCPN.

Fig. 8-19: Distâncias entre aeronaves percebidas pelo ATCo, no primeiro instante em que o conflito é detectado, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

Observa-se também na Fig. 8-19 que, para a filtragem de 3,2 NM, a distância real entre aeronaves é maior do que a conhecida pelo controlador. Isto se deve à ocorrência de erros de precisão no sistema radar, que foram frequentes na filtragem de 3,2 NM. Para deduzir este fato, aplicou-se o seguinte raciocínio: a detecção de conflito só pode ocorrer quando o ATCo detecta que as aeronaves estão a menos de 3,2 NM uma da outra. Como esta distância coincide com a distância de filtragem, apenas um pequeno número de partículas tem ocorrência de conflito antes da filtragem. Isto é confirmado pela Fig. 8-18, na qual a porcentagem de aeronaves com instrução de resolução conflito recebida está em torno de 2% para a filtragem de 3,2 NM. Dentre esta pequena porcentagem, uma parte significativa das aeronaves tem erros de medição do radar, os quais são definidos por uma distribuição probabilística no modelo SDCPN. Por outro lado, para as demais distâncias de filtragem (menores que 3,2 NM), a situação se inverte, embora com diferença menor: a distância real entre as aeronaves é ligeiramente menor que a detectada pelo ATCo. Isto ocorre devido ao tempo de atualização da tela radar, que é definido no modelo como 4 segundos. Como as aeronaves têm a tendência a se aproximar umas das outras, durante o período de atualização ocorre uma pequena aproximação entre elas, que não é visível ao ATCo.

8.3.2 Análise dos Casos de Espaçamento Requerido igual a 45 s

Para o caso onde $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s, observam-se porcentagens ainda maiores de aeronaves que receberam instrução de desvio de rota para resolução de conflito (do que para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s), conforme exibido na Fig. 8-20.

Fig. 8-20: Recebimento de instruções e execução de resolução de conflito nas aeronaves seguidoras, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.

Contudo, a eficácia de tais instruções é prejudicada pelos atrasos com os quais elas são recebidas, conforme é possível observar na Fig. 8-21: de forma semelhante aos casos de $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s, as distâncias detectadas entre aeronaves são pequenas para os níveis de filtragem mais avançados. Entretanto, o fato de o ATCo detectar conflito quando as distâncias já são pequenas demais, para os casos de $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s, é pouco influenciado por haver diferenças de posição vertical entre as aeronaves, pois a maior parte das colisões ocorre sem que haja mudança de altitude das aeronaves.

Fig. 8-21: Distâncias entre aeronaves percebidas pelo ATCo, no primeiro instante em que o conflito é detectado, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.

8.4 Árvores de Falhas

Utilizando as informações apresentadas neste capítulo, foram elaboradas as cadeias mais plausíveis de eventos que resultam em colisão nos cenários simulados, apresentados em forma de árvore de falhas, tanto para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s, ilustrada na Fig. 8-22, como para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s, ilustrada na Fig. 8-23. Tais árvores não são exaustivas, mas apenas visam proporcionar uma melhor compreensão das causas mais prováveis de colisão.

Nestas figuras, as causas-raiz são representadas em forma circular, como por exemplo o evento “*Velocidades iniciais diferem > 20 nós*”. Esta é considerada uma causa raiz porque, ainda que não seja uma condição muito comum no modelo SDCPN, é uma condição inicial probabilisticamente possível neste modelo. Já os eventos que dependem de condições específicas são representados em forma retangular. Por exemplo, o evento “*ATCo não consegue ser eficaz na detecção e resolução de conflito*” depende da ocorrência prévia de conflito. Como as árvores não são exaustivas, nem todas as causas-raiz são apresentadas.

A relação causal entre um evento que é efeito direto de dois ou mais eventos é representada de acordo com o padrão gráfico universal das portas lógicas “E” e “OU”. A porta “E” indica que

o efeito depende da ocorrência prévia de todas as causas, enquanto que a porta “OU” indica que o efeito depende da ocorrência de apenas uma das causas.

Comparando as árvores da Fig. 8-22 e da Fig. 8-23, observam-se diferenças apenas nas causas-raiz. Na Fig. 8-22, as combinação das instruções de mudança de altitude com a omissão ou atraso das instruções de mudança de velocidade contribui para a ocorrência de colisão. Por outro lado, esta combinação não aparece na Fig. 8-23, pois nesse caso foi constatado que as aeronaves estão na mesma altitude; além disso, a árvore desta figura contém causas-raiz referentes a grandes diferenças iniciais de velocidade (> 45 nós), e também aos erros nos instrumentos de medição de velocidade e altitude.

Fig. 8-22: Árvore de eventos que causam colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

Fig. 8-23: Árvore de eventos que causam colisão, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.

8.5 Considerações Finais Sobre o Capítulo

Após a análise do grande conjunto de informações apresentadas neste capítulo, é possível fazer algumas afirmações sobre as causas de colisão nas simulações:

- Erros (possivelmente causados por ruídos) ou mau-funcionamento nos equipamentos da aeronave que tenham influência no controle de velocidade são os fatores de perigo mais relevantes para ocorrência de colisão entre aeronaves que seguem na mesma direção e na mesma rota, nos casos em que $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s; para os casos onde $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s, estes fatores também são relevantes, mas num grau de importância um pouco menor;

- Diferenças grandes de velocidade inicial entre as aeronaves líder e seguidora contribuem significativamente para a ocorrência de colisão, de forma mais impactante para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s do que para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s. Seria recomendável que, quando $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s, caso a velocidade da aeronave seguidora exceda a da aeronave líder acima de um determinado limiar (por exemplo, 5%), um desvio de rota seja solicitado imediatamente pelo ATCo. De acordo com Boursier et al. (2006a), uma grande diferença na velocidade inicial entre as aeronaves poderia existir no caso em que a aeronave seguidora está em uma situação de emergência, e precisa pousar com rapidez; neste caso, a aeronave potencialmente líder da aeronave em emergência seria submetida a um desvio de rota, o que evitaria uma aproximação perigosa entre aeronaves;
- Uma condição frequentemente encontrada nos casos de colisão é a ação tardia do ATCo para controlar velocidades e detectar conflito. As razões destes atrasos, na aplicação real, seriam diversas: excesso de aeronaves no setor, problemas nos sistemas e ferramentas de apoio, treinamento inadequado, etc. Sugere-se avaliar a introdução de ferramentas automáticas de detecção de conflito para baixar o risco de colisão na E-TMA. O próprio ASAS poderia ter funcionalidades adicionais com este propósito; e
- Porcentagens muito pequenas de aeronaves seguidoras que se aproximaram a menos de 2,5 NM das respectivas aeronaves líderes estavam utilizando o ASAS para realizar o espaçamento. Isto significa dizer que as simulações mostram que o ASAS é um sistema seguro.

A análise realizada neste capítulo foi baseada em gráficos construídos a partir de dados estatísticos obtidos nas simulações, e também na especificação do modelo SDCPN apresentada no Capítulo 6. A partir destas informações, foi possível identificar correlações e fazer algumas afirmações sobre as causas de colisões encontradas no ambiente simulado, o que se espera que seja útil para o aperfeiçoamento do procedimento de Espaçamento Temporal Aerotransportado.

9 Conclusão

“Grandes realizações não acontecem num impulso, e sim, através de várias pequenas ações.”

(Vincent Van Gogh)

9.1 Comentários Finais Sobre o Conteúdo Apresentado Neste Trabalho

Ao longo desta tese, foram apresentadas diversas soluções técnicas que podem contribuir para aumentar a capacidade, a eficiência e a segurança do tráfego aéreo, ajudando inclusive a otimizar o impacto ambiental causado pelo consumo de combustível na operação das aeronaves. O núcleo desta tese, constituído pelo estudo de caso desenvolvido e analisado nos capítulos 5 a 8, apresenta como viável o aumento da densidade de tráfego na Área de Movimentação Terminal Estendida (E-TMA), por meio do uso do ASAS para execução do Espaçamento Temporal Aerotransportado.

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa, que é investigar o risco da introdução de procedimentos de Espaçamento Aerotransportado, foi atingido. A avaliação do risco de colisão aponta o limite inferior (inclusivo) de 1 minuto de espaçamento entre aeronaves como um critério seguro, mesmo sem condições de vôo visual e sem o emprego do TCAS (*Traffic Collision Avoidance System*) (ICAO, 2001), pois a OACI (Organização da Aviação Civil Internacional) determina que os níveis de risco sejam determinados sem o uso de tal dispositivo. Por outro lado, sabe-se que, nos aeroportos de maior movimento, pratica-se atualmente, em determinados momentos, uma separação um pouco inferior a 1 minuto entre aeronaves que chegam, condicionada à vigência de alguns critérios: a compatibilidade da esteira de turbulência da aeronave que vai à frente com o porte da aeronave que vai atrás, a configuração das vias para saída da pista de pouso, e condições de vôo visual. Nestas condições, o piloto de uma aeronave pode ver a aeronave que está indo à sua frente e, dessa forma, pode perceber uma eventual aproximação perigosa. Contudo, a presente tese conclui que, com a utilização do Espaçamento Temporal Aerotransportado, 1 minuto é um espaçamento seguro mesmo sem condições de visibilidade, e pode ser realizado sucessivamente por longos períodos de tempo. Estas conclusões se aplicam a uma configuração de E-TMA que foi especificada para estar próxima de configurações existentes em torno nos principais aeroportos do mundo e, pelo fato de as configurações dos espaços

aéreos em torno dos principais aeroportos do Brasil seguir convenções internacionais, as conclusões também se aplicam à realidade do Tráfego Aéreo Brasileiro.

Com o apoio de estudos realizados por outros autores citados ao longo do texto, considera-se seguro o aumento de capacidade de espaço aéreo da E-TMA proporcionado pelo uso do ASAS, o que diminui as restrições de saturação do espaço aéreo, viabilizando possíveis construções de novas pistas em aeroportos existentes, ou a construção de novos aeroportos em áreas terminais congestionadas. Ademais, o Espaçamento Temporal Aerotransportado tornaria mais eficientes os sistemas que auxiliam o gerenciamento de chegadas aos aeroportos (vide seções 2.2.2.1 e 2.2.1). De qualquer forma, o uso do Espaçamento Temporal Aerotransportado por meio do ASAS fica, ao final desta tese, com mais argumentos de aceitação para ser operado na prática com tempos de espaçamento iguais ou maiores que 1 minuto. Mesmo em TMAs e E-TMAs onde a densidade de tráfego é moderada, o ASAS contribui para melhoria do nível de segurança das operações de chegada, uma vez que a maioria dos eventos de aproximação perigosa entre aeronaves, analisados no Capítulo 8, ocorreu em casos de exceção em que o ASAS não chegou a ser utilizado e, conseqüentemente, foram utilizados procedimentos convencionais de aproximação. O resultado disso é que o novo conceito de gerenciamento de tráfego aéreo aqui estudado, com o uso intenso do ASAS, se fortalece como candidato a ser posto em operação nos próximos anos.

É importante observar que as conclusões sobre o nível de risco da operação do Espaçamento Temporal Aerotransportado, obtidas com a avaliação de risco do Capítulo 7, sobre as causas de colisão, analisada no Capítulo 8, referem-se mais especificamente à operação ‘Permanecer em Trilha’ ASAS, descrita na seção 5.3.2. Contudo, acredita-se que a operação ‘Intercalar’ ASAS, descrita na seção 5.3.1, tenha um nível de risco igual ou inferior à operação ‘Permanecer em Trilha’, pois ao fazer a intercalação, as aeronaves vêm de rotas distintas (convergentes) e, portanto, mantêm uma distância transversal de várias milhas náuticas durante a maior parte do tempo no setor da E-TMA (além da distância longitudinal), convergindo para a mesma rota apenas em um ponto mais próximo ao aeroporto de destino. Outra especificidade do estudo de caso desta tese é que a velocidade da aeronave seguidora, quando o Espaçamento Temporal Aerotransportado está sendo realizado, é alterada automaticamente pelo ASAS. De acordo com Hoffman et al. (2006), este modo de funcionamento foi preferido por pilotos em alguns experimentos realizados, para a aproximação inicial e intermediária, enquanto que na aproximação final os pilotos preferiram, em diversos casos, selecionar manualmente a velocidade sugerida pelo ASAS. Como o

presente estudo de caso enfoca justamente a fase de aproximação que precede a aproximação final, os resultados aqui obtidos são válidos para o modo de funcionamento com maior chance de ser efetivamente utilizado na prática.

As conclusões que foram obtidas sobre o modelo formal, apresentadas nos Capítulos 7 e 8, têm fatores de incerteza associados, decorrentes de adoção de hipóteses nas quais se fundamentam o referido modelo formal e sua implementação em código de simulação. Exemplos de tais hipóteses são as distribuições probabilísticas assumidas para os tempos de execução de tarefas pelos operadores humanos, o comportamento do sistema em determinados modos de falha, etc. Por outro lado, a colaboração de especialistas em análise de risco de tráfego aéreo, citados ao longo do texto, em muito contribuiu para garantir um bom nível de consistência na construção do modelo e nas análises realizadas.

Tendo em vista a implantação do ASAS nas aeronaves atualmente existentes (base 2007), é possível fazer uma estimativa do tempo que seria necessário para equipar uma frota completa com este sistema. Considera-se que uma aeronave teria que ficar fora de operação por alguns dias para instalação e teste de voo do ASAS, o que provavelmente seria feito junto a outros procedimentos de manutenção periódica da aeronave. Supondo que uma grande companhia aérea, ao longo de um ano, pode disponibilizar 20% das aeronaves pelo período necessário para realizar tal operação, a atualização de equipamentos em toda a frota seria feita em cinco anos. Considerando que nem todas as companhias aéreas ao redor do mundo farão esta implantação simultaneamente, é relativamente longo o período necessário para implantação completa do ASAS. Por isso, neste período o espaço aéreo das E-TMAs será ocupado por uma mistura de aeronaves capazes e aeronaves não capazes de realizar o Espaçamento Temporal Aerotransportado por meio do ASAS. Mesmo assim, o estudo de Boursier et al. (2006b) mostra que, em um cenário com 50% de aeronaves equipadas com o ASAS, os benefícios do Espaçamento Temporal Aerotransportado já são percebidos, e a integração de aeronaves equipadas e não equipadas com esse sistema é harmônica.

9.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Após o aprendizado adquirido com a elaboração desta tese, é possível fazer algumas recomendações de trabalhos que podem complementar e estender os resultados aqui obtidos.

- i) Tendo em vista um passo à frente na evolução tecnológica do ASAS, recomenda-se que sejam nele incluídos algoritmos específicos para detecção de situações perigosas nas operações de chegada aos aeroportos, no espaço aéreo da E-TMA, de forma que, mesmo

que o espaçamento temporal não esteja sendo executado pelo ASAS, ele funcione como um supervisor de conflito durante as operações de chegada. Isto pode contribuir significativamente para a diminuição do nível de risco dessas operações e, possivelmente, tornar seguro o emprego de espaçamento de 45 segundos entre aeronaves que chegam a uma mesma pista, mesmo com ausência de visibilidade. A aceitabilidade deste tempo de separação está condicionada ao desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa enunciados nos itens (ii) e (iii) a seguir;

- ii) A determinação da porcentagem mínima de aeronaves equipadas com ASAS em função do tempo de separação aplicado. Quando este tempo é igual ou menor que 1 minuto, a presença do ASAS e sua disponibilidade são críticas para a segurança do sistema;
- iii) É altamente recomendável o estudo do risco devido ao encontro de esteira de turbulência durante um procedimento de Espaçamento Temporal Aerotransportado com menos de 1 minuto de separação, considerando sistemas de detecção dinâmica de esteira de turbulência, que têm sido desenvolvidos e testados ultimamente (BARBARESCO et al., 2005);
- iv) Extrapolando os resultados aqui obtidos, é de se supor que o Espaçamento Temporal Aerotransportado também pode melhorar a eficiência e a segurança do tráfego em corredores de alto fluxo, desde os primeiros momentos do voo, após a decolagem, até o início da aproximação final. Corredores de alto fluxo são rotas que interligam pares de aeroportos que, isoladamente, têm um alto fluxo de circulação, como por exemplo: Hong Kong / Taipei, Londres / Nova York, Melbourne / Sidney, Milão / Roma, Cidade do Cabo / Joanesburgo e Rio de Janeiro / São Paulo, entre outras (WILTOX, VEREECKEN, DERUDDER, 2004). A comprovação das melhoras oferecidas por essa outra inovação operacional demandaria novos e interessantes projetos de pesquisa; e
- v) Visando o aperfeiçoamento das ferramentas de análise de risco, uma importante linha de pesquisa é a melhoria das técnicas de simulação Monte Carlo, tanto no aspecto matemático, o que pode ser feito tendo como base o algoritmo IPS utilizado nesta tese, como no aspecto de eficiência computacional, por meio do aperfeiçoamento de estruturas de dados e do uso de linguagens de programação mais eficientes.

9.3 Consideração Final

Para finalizar, coloca-se aqui uma última consideração, que procura corrigir o enfoque parcial pelo qual este trabalho de pesquisa foi guiado.

Tendo aprendido com nosso louvado conterrâneo Santos Dumont, que ficou mortalmente entristecido ao ouvir bombas sendo lançadas por meio do objeto que inventou, nós, que herdamos o dom de voar, saibamos utilizá-lo com prudência: a pressão que a atividade humana, seja econômica ou turística, exerce para que mais e mais aeronaves estejam cruzando os céus, deve ser equilibrada com o instinto de preservação de nossa espécie. Este instinto nos leva a agir, por um lado, para fazer que nenhuma decolagem fique sem o devido pouso e, por outro, para que essas grandes e fascinantes aves de metal não agravem os problemas que já vivenciamos: as intermináveis esperas nos aeroportos, o aquecimento global devido ao consumo de combustíveis fósseis e, de forma mais localizada, mas não menos nociva, as agressões que a construção e operação de aeroportos causam à fauna, à flora e aos nossos tímpanos.

10 Referências Bibliográficas

AATT Markets Report – **AATT Overall Research Study** NAS2-14279, 1997.

ASKOVIC, M. **RAMS and SIMMOD Simulators Comparison**. Undergraduate Thesis, University of Belgrade, 2002.

BADA: User Manual For The Base of Aircraft Data (BADA), REVISION 3.6 - Eurocontrol. Project ACE-C-E2, 2004.

BAKKER, G.J. et al. **Accident Risk Assessment Model For The Free Flight Concept Considered Within Hybridge**. NLR Technical Report, Amsterdam, 2005.

BARBARESCO, F.; FRECH, M.; VAN BAREN, G.B; VERHOOGT, T.H.; SPEIJKER, L.J.P.; VIDAL, A.; DESENFANS, O.; WINCKELMANS, G.; BARNY, H. **ATC Wake System Design and Evaluation. ATC Wake Project** - European Commission, IST-2001-34729, Deliverable D2_12, December 2005.

BLOM, H.A.P.; DAAMS, J.; NIJHUIS, H.B. **Human Cognition Modelling in ATM Safety Assessment**. NLR-TP-2001-053, 2001.

BLOM, H.A.P.; BAKKER, G.J.; BLANKER, P.J.G.; DAAMS, J.; EVERDIJ, M.H.C.; KLOMPSTRA, M.B. **Accident risk assessment for advanced ATM**. NLR-TP 2001-642, 2001.

BLOM, H.A.P.; BAKKER, B.; EVERDIJ, M.H.C.; PARK, M.v.d. **Stochastic analysis background of accident risk assessment for Air Traffic Management**. Hybridge report D2.2, NLR, Amsterdam, 2003.

BLOM, H. A. P. **Hybrid stochastic dynamical modeling of accident risk in air traffic**. Summer Pedagogical School in Hybrid Systems, Lecture 3. University of Patras, Greece, 22-24 September, 2004.

BLOM, H.A.P.; BAKKER, G.J.; KRYSTUL, J.; EVERDIJ, M.H.C.; KLEIN OBBINK, B.; KLOMPSTRA, M. **Sequential Monte Carlo simulation of collision risk in free flight air traffic**. Hybridge Project, Contract IST-2001-32460 of European Commission; Deliverable Number D9.4, Version 1.0, August, 2005.

BLOM, H.A.P.; EVERDIJ, M.H.C. **Modelling hybrid state Markov processes through stochastically and dynamically coloured Petri Nets**. Hybridge report D2.4, NLR, Amsterdam, 2005.

- BLOM, H.A.P.; KRYSTUL, J. **Generalised stochastic hybrid processes as strong solutions of stochastic differential equations**. Hybride report D2.3, NLR, Amsterdam, 2005.
- BOURSIER, L.; HOFFMAN, E.; ROGNIN, L.; VERGNE, F.; ZEGHAL, K. **Airborne Spacing in the Terminal Area: A Study of Non-Nominal Situations** (AIAA 2006-7783) 6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO), Wichita, Kansas, 25 - 27 September 2006a.
- BOURSIER, L.; FAVENNEC, B.; HOFFMAN, E.; ROGNIN, L.; VERGNE, F. TRZMIEL, A.; ZEGHAL, K. **Airborne Spacing in the Terminal Area: Controller Experiments on Mixed Equipage, Abnormal Situations and Transition**. Eurocontrol Experimental Centre, EEC Note no. 24/06, 2006b.
- BRADFORD, S.; LIANG, D.; MONDOLONI, S. **Using Inter-Process to Expand Modeling Capabilities**. 2nd USA/Europe ATM R&D Seminar, Orlando, December, 1998.
- CARE – CARE/ASAS Activity 3 - **“OHA Template”** Technical Note, version 1.0 – May, 2001.
- CARE – CARE/ASAS Activity 3 - **Airborne Separation Minima - Final Report**
CARE/ASAS/Sofréavia/01-018 - Version 2.1 - April 3, 2002.
- CDM Scenarios – European CDM. Sítio da Web: <http://www.euro-cdm.org/scenarios.html>
Acessado em julho de 2004.
- CÉROU, F.; MORAL, P.d.; GLAND, P.I.; LEZAUD, P. **Genetic genealogical models in rare event analysis**. Hybride Project, Contract IST-2001-32460 of European Commission; Deliverable Number D8.1 Report, 2002.
- CHIN, D. K.; MELONE, F. **Using Airspace Simulation To Assess Environmental Improvements From Free Flight and CNS/ATM Enhancements**. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, Phoenix, December, 1999.
- CIP 2005 **National Airspace System - Capital Investment Plan Fiscal Years 2005 - 2009**. Federal Aviation Administration, 2004.
- CLOAREC, D.; PURVES, K.; VERGNE, F. **CoSpace 2003 Controller Model Based Study Assessment of Airborne Spacing Tasks in the Extended TMA**. EEC Report no. 392. Eurocontrol Experimental Centre, Brétigny-sur-Orge, France, 2004.
- COSPACE: **CoSpace 2003 Aircraft Guidance Model Based Experiments - Evaluation of Airborne Spacing for Traffic Sequencing**. EEC Report No. 391 - Eurocontrol Experimental Centre, 2004.

COSPACE: Sequencing arrival flows with spacing instructions (ASAS). Ground prototyping session. Eurocontrol CoSpace Project, 30-31 January, 2006a.

COSPACE Hazop Report. Eurocontrol Cospace Project. Draft V1.6, Wednesday, September 12, 2006b.

CTAS Center TRACON Automation System. Sítio da Web:

http://www.ctas.arc.nasa.gov/project_description. Última atualização em junho de 2003. Acessado em outubro de 2004.

ELEFANTE, S.; GOODCHILD, C.; VILAPLANA, M.A.A. **Strategic and Tactical Tool for ATFM Planning based on Statistics and Probability Theory.** 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Santa Fe, USA, 2001.

ERZBERGER, H. Transforming the NAS: **The Next Generation Air Traffic Control System.** In: Proceedings of ICAS 2004 – 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2004.

EVERDIJ, M.H.C.; BAKKER, G.J.; BLOM, H.A.P. **Bias and uncertainty in accident risk assessment of an Extended Free Flight Operational Concept.** National Aerospace Laboratory report: NLR-TR-2002-691, November 2002.

EVERDIJ, M.H.C.; BLOM, H.A.P. **Bias and Uncertainty in Accident Risk Assessment,** TOSCA-II WP4 Phase 2 Final Report, TOSCA/NLR/WPR/04/05/10. National Aerospace Laboratory NLR, report CR-2002-137, 2002.

EVERDIJ, M.H.C.; BLOM, H. A.P. **Petri-Nets and Hybrid-State Markov Processes in a Power-Hierarchy of Dependability Models.** In Proceedings: IFAC Conference - Analysis and Design of Hybrid Systems 16-18 June, Saint-Malo, Brittany, France, 2003.

EVERDIJ, M.H.C.; BLOM, H.A.P. **Modelling Hybrid State Markov Processes Through Dynamically and Stochastically Coloured Petri Nets.** Hybridge Project, Deliverable D2.4. Contract IST-2001-32460 of European Commission. Amsterdam, September, 2004.

EVERDIJ, M.H.C.; BLOM, H.A.P. **Piecewise deterministic Markov processes represented by dynamically coloured Petri nets.** Stochastics: An International Journal of Probability and Stochastic Processes. Vol. 77, No. 1, February, 2005, pp. 1-29.

FAA Aerospace Forecasts - Fiscal Years 2004-2015. U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration, Office of Aviation Policy & Plans, March, 2004.

FAA-FFP1 FFP1 - Federal Aviation Administration: **Welcome to Free Flight** <http://ffp1.faa.gov>, 2002.

GERMAN, R. **Performance Analysis of Communication Systems: Modelling with Non-Markovian Stochastic Petri Nets**. (livro) 1a Ed., England. John Wiley & Sons, Ltd, 2000.

GRIMAUD, I.; HOFFMAN, E.; ROGNIN, L.; ZEGHAL, K. **Spacing Instructions in Approach: Assessing Usability from the Air Traffic Controller Perspective**. Guidance, Navigation, and Control Conference, Austin, Texas, 11-14 Aug. 2003.

GRUENWALD, A. **PNK's User Manual**. Disponível na página Web. <http://www2.informatik.hu-berlin.de/top/pnk/doku/pnk-guide/quickStart.html>. Atualizado em agosto de 2001, acessado em Dezembro de 2006.

HANSMAN, R. J. et al. **Integrated Human Centered Systems Approach to the Development of Advanced Air Traffic Management Systems**. Air Traffic Management Research & Development Seminar - Saclay, France, June, 1997.

HOFFMAN, E.; PÈNE, N.; ROGNIN, L.; TRZMIEL, A.; ZEGHAL, K. **Airborne Spacing: Managed vs. Selected Speed Mode on the Flight Deck**. (AIAA 2006-7782) 6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO), Wichita, Kansas, 25 - 27 September 2006.

HOLLNAGEL, E. **Human reliability analysis, context and control**. Academic Press, London, 1993.

HOOGERS, P.W.; KLEIN, H.C.M.; THIAGARAJAN, P.S. **An Event Structure Semantics for General Petri Nets**. Theoretical Computer Science, Elsevier, 1996.

HOWELL, D.; BENNETT, M.; BONN, J. **Estimating the En Route Efficiency Benefits Pool**. 5th USA/Europe ATM R&D Seminar, Budapest, June, 2003.

ICAO: **Review of the General Concept of Separation Panel Sixth Meeting**, Montreal, 28 November, RGCSP/6, Volumes 1 and 2. ICAO Doc 9536, 1988.

ICAO: **Manual of Air Traffic Services Data Link Applications**. First Edition - ICAO Doc 9694-AN/955, 1999.

ICAO: **International Standards and Recommended Practices - Air Traffic Services Annex 11**. ICAO, 13-th edition, 2001.

ICAO: **Airborne Separation Assistance System (ASAS) Circular**. Version 2.0E. AN-Conf/11-IP/5 - ASAS .International Civil Aviation Organization, September, 2003.

ICAO: **Outlook for the Air Transport to the Year 2015**. ICAO Circular 304 AT/127, September 2004.

ICAO: **The world of Civil Aviation 2003-2006**. ICAO Circular 307 AT/129, 2005.

ICAO: **Airline Traffic Forecasts and Financial Trends - 2005 to 2007**. ICAO Circular 308 AT/130, January 2006.

IMA-100-12 **Regras do Ar e Serviço de Tráfego Aéreo** (IMA100-12). Ministério da Aeronáutica - Departamento de Eletrônica e Proteção ao Voo, 1999.

IVANESCU, D.; SHAW, C.; HOFFMAN, E.; ZEGHAL, K. **Design of an Airborne Spacing Director to Minimise Pilot Speed Actions**. 6th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Baltimore, Maryland, June 2005.

JEDDI, B.; SHORTTLE, J.; SHERRY, L. **Statistics of the Approach Process at Detroit Metropolitan Wayne County Airport**. In Proceedings of: Second International Conference on Research in Air Transportation - Belgrade, June 24-28, 2006.

KOPARDEKAR, P.; MAGYARITS, S. **Measurement and Prediction of Dynamic Density**. 5th USA/Europe ATM R&D Seminar, Budapest, June, 2003.

KRYSTUL, J.; BLOM, H.A.P. **Sequential Monte Carlo simulation of rare events in hybrid systems**. Hybridge Project, Contract IST-2001-32460 of European Commission; Deliverable number D8.3, Version 0.7, 2004.

KRYSTUL, J.; BLOM, H.A.P. **Sequential Monte Carlo simulation of rare event probability**. Hybridge Project, Contract IST-2001-32460 of European Commission; Deliverable number D9.3, Version 1.0, 2nd March, 2005.

LAMBGRETS, A.A. **Vertical Flight Path and Speed Control Autopilot Design using Total Energy Principles**. AIAA-83-2239, 1983a.

LAMBREGTS, A.A. **Integrated System Design for Flight Path and Propulsion Control Using Total Energy Principles**. AIAA paper 83-2561 CP of Aircraft Design, Systems and Technology Meeting, October 17-19, Forth Worth, Texas 1983b.

LANDRY, S.; FARLEY, T.; FOSTER, J.; GREEN, S.; HOANG, T.; WONG, G.L. **Distributed Scheduling Architecture for Multi-Center Time-Based Metering**. AIAA Aircraft Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference, Denver, CO, November 17-19, 2003.

LEVESON, N.G.; STOLZY, J.L. **Safety Analysis Using Petri Nets**. IEEE Transactions on Software Engineering, vol. SE-13, no. 3, March 1987.

- LYGEROS, J.; GLOVER, W. **A Multi-Aircraft Model for Conflict Detection and Resolution Algorithm Evaluation**. HYBRIDGE Deliverable 1.3. WP1: Identification and modelling of uncertain hybrid systems, 2004.
- MACIEL, P.R.M; LINS, R.D.; CUNHA, P.R.F. **Introdução às Redes de Petri e Aplicações**. 10a Escola de Computação, Brasil: IMECC-UNICAMP, 1996.
- MASALONIS, A.J.; CALLAHAM, M.B.; WANKE, C.G. **Dynamic Density and Complexity Metrics for Realtime Flow Management**. 5th USA/Europe ATM R&D Seminar, Budapest, June, 2003.
- MIQUEL, T.; LOSCOS, J-M.; CASAUX, F., MORA-CAMINO, F. **Statistical Performance Evaluation Between Linear and Nonlinear Designs for Aircraft Relative Guidance**. 6th USA & Europe ATM Seminar, Baltimore, 2005.
- MONTICONE, L.C.; SNOW, R.E.; WANG, P.T.R. **Modeling of Air/Ground Air Traffic Control Communications for Fast-Time Simulation**. MITRE Technical Paper, May 2006.
- MURATA, T. **Petri Nets: Properties, Analysis and Applications**. In: "Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No 4, April 1989.
- NCAG 2 **Nova Circulação Aérea Geral, Fase 2**. Comando da Aeronáutica, Depto. de Controle do Espaço Aéreo - DECEA. 10 de junho de 2004. Disponível através do sítio da Web: <http://www.decea.gov.br> (acessado em outubro de 2004).
- ODONI, A.R.; BOWMAN, J.; DELAHAYE, D.; DEYST, J.J.; FERON, E.M.; HANSMAN, R.J.; KHAN, K.A.; KUCHAR, J.K.; PUJET, N.; SIMPSON, R.W. **Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts Modeling Research Under NASA/AATT**. Massachusetts Institute of Technology, International Center for Air Transportation. March, 1997.
- OLIVEIRA, I.R. **Verificação de Segurança em Confluência de Trajetórias de Aeronaves Utilizando Autômatos Híbridos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, 2003.
- OLIVEIRA, I.R.; SILVA, J.M.; CAMARGO JR.; J.B.; CUGNASCA, P.S.; FONSECA, R.R. **An Evolutive Environment for the Development of Free-Flight**. In: Spitzer, C.; Schmocker; U.; and Dang, V. N.: Proceedings of PSAM - International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 2004, Volume 1, pp. 513-518. Springer-Verlag, Berlin, 2004.

OLIVEIRA, I.R.; BAKKER, G.H.J.; BLOM, H.A.P. **Accident Risk Assessment Model For ASAS Time-Based Spacing Operation**. NLR Technical Report, 2006.

PEPPER, J.W.; MILLS, K.; R.; WOJCIK, L. A. **Predictability and Uncertainty in Air Traffic Flow Management**. 5th USA/Europe ATM R&D Seminar, Budapest, June, 2003.

PETERSON, J.L. **Petri Net Theory and the Modeling of Systems**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981.

PIDUCH, J. M. **Orchestrated Approach**. Air traffic Management Directory 1999-2000. Euromoney Institutional PLC, 2000.

PRANDINI, M.; WATKINS, O. **Probabilistic Aircraft Conflict Detection**. HYBRIDGE Deliverable D3.2. Contract IST-2001-32460 of European Commission, 2005.

PURVES, K.; VERGNE, F. **CoSpace 2004 Controller Model Based Study Assessment of Airborne Spacing Tasks in The TMA**. Eurocontrol Experimental Centre - EEC Report no. 400, Brétigny, September, 2005.

RAMS Plus User Manual Release 5.23, ISA Software, March, 2005.

RFG - SPR SG: Package I – **Enhanced Sequencing and Merging Operations (ASPA-S&M) Application Description**. Requirement Focus Group, 19th of August 2005.

ROCKMAN, M.J. **A Review of the Current Radar Separation Minima and Some Thoughts on Reducing Them**. MITRE Corporation, July 29, 1994.

RTCA **Government/Industry Operational Concept for the Evolution of Free Flight**, Edition 2. Issued 8-16-00, Free Flight Steering Committee, 2000.

SKYWAY ATC decision-making support tools - **Medium-Term Conflict Detection shows promising future**. Skyway Magazine - Eurocontrol, Summer 2004.

SOFREÁVIA **System Development, ATC Systems**. Disponível pela página Web <http://www.sofreavia.com/pages/projects/index.html>. Acessado em outubro de 2004.

SORENSEN, C.; LIANG, D.; CROOK, I.; **Limited Dynamic Re-Routing (LDRR)**. 5th USA/Europe ATM Seminar, Budapest, June 2003.

VAN DER GEEST, P.J. **The AMAAI Modelling Toolset for the Analysis of In-Trail Following Dynamics**. AMAAI Deliverable D2: Description and User Guide. NLR-CR-2002-112, 2002.

VAN ES, G.W.H. **Review of Air Traffic Management-related accidents worldwide: 1980-2001**. NLR Technical Publication – NLR-TP-2003-76, Amsterdam, 2003.

VINK, A. **EATCHIP Medium Term Conflict Detection**. 1st USA / Europe ATM R&D Seminar. Disponível no sítio Web <http://atm-seminar-97.eurocontrol.fr/vink.htm>, 1997.

WILTOX, F.; VEREECKEN, L.; DERUDDER, B. **Mapping the Global Network Economy on the Basis of Air Passenger Transport Flows**. GaWC Research Bulletin #157. Disponível no sítio Web <http://www.lboro.ac.uk/gawc/rb/rb157.html>. Atualizado em dezembro de 2004.

Apêndice A. Alguns Aspectos Técnicos da Dinâmica das Aeronaves

Este apêndice reúne detalhes técnicos de modelagem da operação de Espaçamento Temporal ASAS, considerados na fase de elaboração do modelo, dentre os quais os mais adequados foram incorporados na definição do modelo SDCPN para esta aplicação.

A.1. Dinâmica da Aeronave

O modelo de aeronave assumido é o de Van der Geest (2002), que faz parte do projeto AMAAI (Aircraft Models for Analysis of ADS-B based In-trail following), desenvolvido para o Eurocontrol. Esta seção apresenta as equações que representam a dinâmica da aeronave, que seguem abaixo:

$$\dot{\gamma} = \frac{L + T \cdot \sin \alpha}{m \cdot V} \cdot \cos \varphi - \frac{g}{V} \cdot \cos \gamma \quad (\text{A-1})$$

$$\dot{V} = \frac{T \cdot \cos \alpha - D}{m} - g \cdot \sin \gamma \quad (\text{A-2})$$

$$\dot{h} = V \cdot \sin \gamma \quad (\text{A-3})$$

$$\dot{\varphi} = p \quad (\text{A-4})$$

$$\dot{\psi} = \frac{g \cdot \tan \varphi}{V} \quad (\text{A-5})$$

$$\dot{x}_{east} = V \cdot \cos \gamma \cdot \cos \psi - V_{wind} \cdot \cos \chi_{wind} \quad (\text{A-6})$$

$$\dot{x}_{north} = V \cdot \cos \gamma \cdot \sin \psi - V_{wind} \cdot \sin \chi_{wind} \quad (\text{A-7})$$

Onde os símbolos são definidos da seguinte forma:

D	Arrasto (N)
G	Constante gravitacional (9.80665 m/s ²)
L	Força de sustentação (N)
M	Massa da Aeronave (kg)
p	Velocidade de rolagem (rad/s)
T	Empuxo do motor (N)
V	Velocidade em relação ao ar (m/s)
x	Posição da aeronave (m)

α	Ângulo de ataque (rad)
χ_{wind}	Direção do vento (rad)
γ	Ângulo do caminho vertical (rad)
φ	Ângulo de rolagem (rad)
ψ	Ângulo de proa (rad)

O software de simulação utiliza estas equações com esquema de integração de primeira ordem, com passo de tempo igual a 0,2 s.

A próxima seção descreve o algoritmo de controle integrado de velocidade e altitude da aeronave.

A.2. Sistema de Controle de Energia Total (TECS)

O modelo AMAAI estabelece um modelo genérico de piloto automático (controle automático de velocidade e altitude) que pode ser adaptado com facilidade para uma diversidade muito grande de tipos de aeronave, e provê todas as funcionalidades e o desempenho dos modernos sistemas de piloto automático. Para este propósito, um conceito bastante apropriado é o assim chamado Sistema de Controle de Energia Total (TECS), cujos princípios são bem conhecidos e bem documentados (LAMBREGTS, 1983a e 1983b).

A base do conceito TECS é formada pela aplicação de princípios de energia, da seguinte maneira:

A equação governante da energia de uma massa movente é:

$$E = W \cdot \left(h + \frac{V^2}{2g} \right) \quad (\text{A-8})$$

A taxa de mudança na energia total E pode ser encontrada pela diferenciação da equação (A-8).

$$\dot{E} = W \cdot \left(\dot{h} + V \frac{\dot{V}}{g} \right) \quad (\text{A-9})$$

Aproximando o ângulo do caminho vertical de vôo por $\gamma = \dot{h}/V$, a taxa específica não-dimensional de energia pode ser escrita como:

$$\dot{E}_{sp} = \frac{\dot{E}}{V \cdot W} = \gamma + \frac{\dot{V}}{g} \quad (\text{A-10})$$

Esta taxa também é conhecida como ângulo potencial do caminho vertical de vôo. O conceito TECS é diretamente voltado para controle do ângulo potencial do caminho vertical de vôo. O princípio básico é que este ângulo pode ser modificado consistentemente apenas através da mudança do estado de energia da aeronave, por meio do aumento ou redução do empuxo dos motores.

A distribuição da energia para as componentes longitudinal e vertical de vôo é feita através do controle do ângulo de ataque (α) da aeronave. Isto leva a um controlador simples, mas bastante efetivo, que calcula o empuxo e o ângulo de ataque requeridos da seguinte maneira:

$$T_{cmd} = \left\{ (\gamma_{cmd} - \gamma) + \frac{\dot{V}_{cmd} - \dot{V}}{g} \right\} \cdot W \quad (\text{A-11})$$

$$\alpha_{cmd} = \left\{ (\gamma_{cmd} - \gamma) - \frac{\dot{V}_{cmd} - \dot{V}}{g} \right\} \quad (\text{A-12})$$

Tais são as equações nas quais se baseia o TECS, que combina termos proporcionais, derivativos e integrais das equações acima. Acima do controlador básico, diversas funções foram adicionadas como leis externas de controle, provendo comandos de ângulo do caminho vertical de vôo (γ_{cmd}) e aceleração ($\dot{V}_{cmd}$). Os detalhes de como estes comandos funcionam podem ser encontrados em (VAN DER GEST, 2002).

Combinando as equações apresentadas neste capítulo até este ponto, obtemos o sistema da Fig. A-1.

Fig. A-1: Malha básica de controle da aeronave.

A.3. Algoritmo de Espaçamento Temporal

O algoritmo de Espaçamento Temporal de Van der Geest (2002) foi validado com sucesso em relação ao modelo de transmissão ADS-B, dentro do projeto AMAAI, e reconhecido pela comunidade científica da área.

Antes de se decidir definitivamente por este algoritmo, outras possibilidades foram consideradas, incluindo modelos bastante simplificados que poderiam tornar o software mais rápido. Entretanto, após implementar um protótipo que seguia o modelo AMAAI, observou-se que ele apresenta resultados bem mais realistas que o primeiro modelo, e não causa um impacto excessivo no desempenho do software.

O controlador de espaçamento é projetado de tal forma que pode ser usado como uma malha externa à malha básica de controle da aeronave (Fig. A-1), conforme a arquitetura que se espera para uso nas aeronaves reais. Por outro lado, como o projeto AMAAI enfoca aspectos mais conceituais, diversos detalhes de implementação prática não foram considerados, como largura de banda dos sinais, ruídos, atraso, desvios no sinal, e também detalhes da lógica do sistema. Tais detalhes são bastante dependentes da aeronave concreta no qual se vai introduzir o sistema, demandam bastante trabalho, e não fazem parte do projeto AMAAI nem do presente estudo.

O algoritmo de espaçamento escolhido para o presente estudo segue o conceito de Atraso Temporal Constante (CTD), apresentado na subseção seguinte.

A.4. Conceito de Atraso Temporal Constante

Este conceito consiste em a aeronave seguidora tentar emparelhar sua posição corrente com a posição passada da aeronave líder, com um atraso fixo.

De fato a aeronave seguidora faz uma estimativa da posição passada da aeronave líder, com o tempo de espaçamento passado. O cálculo da posição da aeronave líder é baseado na sua velocidade solo corrente, multiplicada pelo tempo de espaçamento, que é expresso em segundos:

$$t_{erro\ CTD} = \frac{y_{lid} - y_{seg}}{V_{lid\ TAS}} - separação_{tempo} \quad (A-13)$$

Por outro lado, o erro espacial também pode ser calculado:

$$y_{erroCTD} = y_{lid} - y_{seg} - \text{separação}_{distânciaCTD} \quad (A-14)$$

Onde: $\text{separação}_{distânciaCTD} = \text{separação}_{tempo} \cdot V_{lid}$.

A conversibilidade de critérios espaciais e temporais é utilizada no projeto do controlador de espaçamento.

A.5. Projeto do Controlador de Espaçamento

Baseado no conceito de CTD, o projeto do controlador de espaçamento foi baseado em uma lei que controla a distância entre as duas aeronaves. Para o espaçamento temporal, o erro temporal é convertido para erro espacial de acordo com as equações (A-13) e (A-14). O controlador de espaçamento foi projetado para prover valores comandados de velocidade em relação ao ar calibrada (CAS) para o piloto automático. Baseado na análise clássica de lugar das raízes, pode ser demonstrado que a lei básica de controle requer o conceito de “controlador acelerado” de segunda ordem, para garantir estabilidade do controlador em malha fechada. Na terminologia da teoria de controle, isto significa que dois zeros complexos são colocados no semiplano esquerdo, que atraem dois pólos potencialmente instáveis da função de transferência da malha aberta para a área estável, quando a malha é fechada. A teoria subjacente a esta explicação pode ser encontrada em diversos manuais de teoria clássica de controle.

A lei básica de controle precisa ser complementada com termos proporcionais e integrais (PI) para se prevenir erros de estado estacionário.

Isto significa que a lei de controle básica tem a forma (no domínio da frequência):

$$V_{cmd} = K_p \cdot y_{erro} \cdot \left(s^2 + 2\zeta_{man} \omega_{man} \cdot s + \omega_{man}^2 \right) \cdot \frac{(K_i + s)}{s} \quad (A-15)$$

Nesta equação o parâmetro ω_{man} pode ser interpretado como largura de banda de manobra, e ζ_{man} como fator de amortecimento de manobra. Estes dois parâmetros são muito importantes para as características da lei de controle. Deve ser notado que o amortecimento da malha fechada de controle atinge o valor de amortecimento de manobra apenas quando o ganho proporcional da malha, (K_p) aproxima-se do infinito. Entretanto, para atingir amortecimento quase-crítico do sistema, é necessário selecionar um valor superamortecido para ζ_{man} . Com respeito ao ganho integral (K_i), é evidente que este parâmetro introduz outro zero na lei de

controle. Deve ser evitada a seleção de valores altos para este ganho, porque isto pode introduzir picos transitórios. Os detalhes para determinação dos valores numéricos destes parâmetros estão explicados em (VAN DER GEEST, 2002).

A equação (A-15) representa um sistema irrealizável de controle, porque é requerida diferenciação dupla (s^2) do erro de espaçamento y_{erro} . Este problema de implementação pode ser solucionado por meio de se usar, como primeira derivada do erro de espaçamento, a diferença de velocidade em relação ao ar entre a aeronave líder e a seguidora. A segunda derivada do erro de espaçamento pode ser calculada a partir da diferença em aceleração longitudinal entre as duas aeronaves. Entretanto, esta informação não é transmitida via ADS-B e, caso fosse, exigiria uma alta taxa de atualização. Por estes motivos, o termo com a segunda derivada é aproximado pelo uso de um filtro de “taxa” na diferença de velocidades. Estas considerações levam à seguinte equação realizável da lei de controle:

$$V_{cmd} = K_p \left[y_{erro} \cdot \omega_{man}^2 + \left\{ \frac{s + 2\zeta_{man} \omega_{man}}{\tau_{lid} s + 1} \cdot (V_{lid} - V_{prop}) \right\} \right] \frac{(K_i + s)}{s} \quad (A-16)$$

Esta expressão é a base da implementação do controlador de espaçamento, embutido no bloco ASAS conforme a Fig. A-2.

Fig. A-2: Malha de controle da aeronave seguidora com o ASAS.

Entretanto, para que a equação (A-16) seja implementada em código de simulação, ela precisa ser transformada para o domínio do tempo. Para isso, a equação (A-16) será transformada numa Equação Diferencial Ordinária (ODE) Linear.

$$sV_{cmd} = K_p \left[y_{erro} \omega_{man}^2 + \left\{ \frac{s + 2\zeta_{man} \omega_{man}}{\tau_{lid} s + 1} (V_{lid} - V_{prop}) \right\} \right] \cdot (K_i + s)$$

$$\Leftrightarrow s(\tau_{lid} s + 1)V_{cmd} = K_p \left\{ y_{erro} \omega_{man}^2 (\tau_{lid} s + 1) + (s + 2\zeta_{man} \omega_{man}) \cdot (V_{lid} - V_{prop}) \right\} \cdot (K_i + s)$$

$$\Leftrightarrow \left(s^2 + \frac{s}{\tau_{lid}} \right) V_{cmd} = \frac{K_p}{\tau_{lid}} (\tau_{lid} s + 1) \cdot (K_i + s) y_{erro} \omega_{man}^2 + \frac{K_p}{\tau_{lid}} (s + 2\zeta_{man} \omega_{man}) \cdot (K_i + s) \cdot (V_{lid} - V_{prop}) \quad (A-17)$$

Fazendo $\tilde{V} = V_{lid} - V_{prop}$, é possível deduzir, em poucos passos, que a equação (A-17), quando transformada para o domínio do tempo, é equivalente a

$$\ddot{V}_{cmd} + a_1 \dot{V}_{cmd} + a_0 V_{cmd} = c_2 \ddot{y}_{error} + c_1 \dot{y}_{error} + c_0 y_{error} + d_2 \ddot{\tilde{V}} + d_1 \dot{\tilde{V}} + d_0 \tilde{V} \quad (A-18)$$

com coeficientes a_i , c_i e d_i constantes conhecidos e $a_0=0$. Pelo fato de se ter $a_0=0$, não é possível deduzir uma fórmula fechada para V_{cmd} . Além disso, os valores iniciais de V_{cmd} e de suas derivadas não são conhecidos. Neste caso, de acordo com o método de Análise em Espaço de Estados, utiliza-se o artifício de definir uma variável auxiliar x para estabelecer uma relação entre V_{cmd} e suas derivadas. Com este intuito, a equação (A-18) pode ser reescrita como um sistema equivalente de duas equações:

$$\ddot{y}_1 + a_1 \dot{y}_1 + a_2 y_1 = c_2 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + c_0 u_1 \quad (A-19)$$

$$\ddot{y}_2 + a_1 \dot{y}_2 + a_2 y_2 = d_2 \ddot{u}_2 + d_1 \dot{u}_2 + d_0 u_2 \quad (A-20)$$

$$\text{com } \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{error} \\ \tilde{V} \end{bmatrix}, \text{ e } V_{cmd} = y_1 + y_2 = y.$$

Por sua vez, a equação (A-19) pode ser reescrita como um sistema de duas equações:

$$\dot{x}_1 = Ax_1 + B_1 u_1 \quad (A-21)$$

$$y_1 = Cx_1 + D_1 u_1 \quad (A-22)$$

E o mesmo pode ser feito para (A-20):

$$\dot{x}_2 = Ax_2 + B_2 u_2 \quad (A-23)$$

$$y_2 = Cx_2 + D_2 u_2 \quad (A-24)$$

onde:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -a_0 \\ 1 & -a_1 \end{pmatrix}, \quad B_1 = \begin{pmatrix} c_0 - a_0 c_2 \\ c_1 - a_1 c_2 \end{pmatrix}, \quad B_2 = \begin{pmatrix} d_0 - a_0 d_2 \\ d_1 - a_1 d_2 \end{pmatrix}, \\ C = (0 \quad 1), \quad D_1 = c_2 \quad D_2 = d_2$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A-25})$$

$$y = y_1 + y_2 \quad (\text{A-26})$$

Combinando as seis últimas equações, obtém-se o novo sistema:

$$\dot{x} = Ax + B_1 u_1 + B_2 u_2 \quad (\text{A-27})$$

$$y = Cx + D_1 u_1 + D_2 u_2 \quad (\text{A-28})$$

Na forma matricial mais concisa, o sistema fica:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{A-29})$$

$$y = Cx + Du \quad (\text{A-30})$$

onde $B = (B_1 \ B_2)$, $D = (D_1 \ D_2)$ e $u = (u_1 \ u_2)^T$.

Para provar que esta transformação é possível, toma-se a equação (A-27), e se lha transforma para o domínio de Laplace.

$$\begin{aligned} sx = Ax + B_1 u_1 + B_2 u_2 &\Leftrightarrow sx - Ax = B_1 u_1 + B_2 u_2 \Leftrightarrow s(x - A) = B_1 u_1 + B_2 u_2 \\ &\Leftrightarrow x = (sI - A)^{-1} (B_1 u_1 + B_2 u_2) \end{aligned} \quad (\text{A-31})$$

Substituindo esta última equação na equação (A-28), tem-se

$$\begin{aligned} y &= C(sI - A)^{-1} (B_1 u_1 + B_2 u_2) + D_1 u_1 + D_2 u_2 \\ &\Leftrightarrow y = \{C(sI - A)^{-1} B_1 + D_1\} \cdot u_1 + \{C(sI - A)^{-1} B_2 + D_2\} \cdot u_2. \end{aligned} \quad (\text{A-32})$$

Por outro lado,

$$(sI - A) = \begin{pmatrix} s & a_0 \\ -1 & s + a_1 \end{pmatrix} \Leftrightarrow (sI - A)^{-1} = \frac{\begin{pmatrix} s + a_1 & -a_0 \\ 1 & s \end{pmatrix}}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

e, dessa forma,

$$C(sI - A)^{-1} B_1 = \frac{(0 \ 1) \begin{pmatrix} s + a_1 & -a_0 \\ 1 & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_0 - a_0 c_2 \\ c_1 - a_1 c_2 \end{pmatrix}}{s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{c_0 - a_0 c_2 + (c_1 - a_1 c_2)s}{s^2 + a_1 s + a_0},$$

$$C(sI - A)^{-1} B_2 = \frac{\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s + a_1 & -a_0 \\ 1 & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_0 - a_0 d_2 \\ d_1 - a_1 d_2 \end{pmatrix}}{s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{d_0 - a_0 d_2 + (d_1 - a_1 d_2)s}{s^2 + a_1 s + a_0}.$$

Com isso, é possível calcular os termos de (A-32). Começando pelo primeiro termo do lado direito:

$$\begin{aligned} [C(sI - A)^{-1} B_1 + D_1] \cdot u_1 &= \left[\frac{c_0 - a_0 c_2 + (c_1 - a_1 c_2)s}{s^2 + a_1 s + a_0} + c_2 \right] \cdot u_1 \\ &= \left[\frac{c_0 - a_0 c_2 + (c_1 - a_1 c_2)s + c_2(s^2 + a_1 s + a_0)}{s^2 + a_1 s + a_0} \right] \cdot u_1 \\ &= \left[\frac{c_0 + c_1 s + c_2 s^2}{s^2 + a_1 s + a_0} \right] \cdot u_1 \end{aligned}$$

Seguindo o mesmo processo para o segundo termo, obtém-se:

$$[C(sI - A)^{-1} B_2 + D_2] \cdot u_2 = \left[\frac{d_0 + d_1 s + d_2 s^2}{s^2 + a_1 s + a_0} \right] \cdot u_2.$$

E, substituindo de volta em (A-32), verifica-se:

$$\begin{aligned} y &= \left[\frac{c_0 + c_1 s + c_2 s^2}{s^2 + a_1 s + a_0} \right] \cdot u_1 + \left[\frac{d_0 + d_1 s + d_2 s^2}{s^2 + a_1 s + a_0} \right] \cdot u_2 \\ &\Leftrightarrow y(s^2 + a_1 s + a_0) = (c_0 + c_1 s + c_2 s^2) \cdot u_1 + (d_0 + d_1 s + d_2 s^2) \cdot u_2, \end{aligned}$$

que, transformado para o domínio do tempo, equivale ao sistema composto pelas equações (A-19) e (A-20) e, portanto, equivale à equação (A-18) (c.q.d.).

O sistema composto pelas equações (A-19) e (A-20) constitui um sistema linear e invariante no tempo (LTI), e foi adaptado para ser utilizado em intervalos discretos de tempo. O método de extrapolação de ordem zero (*zero-order hold*) foi utilizado para encontrar um sistema linear invariante no deslocamento, que é a aproximação discreta do LTI. O sistema discretizado depende do passo de tempo escolhido e, para se obter uma precisão aceitável, foi escolhido o passo de integração de 0,2 segundo.

O sistema discretizado fica:

$$x_{k+1} = \tilde{A}x_k + \tilde{B}u_k \quad (\text{A-33})$$

$$y_{k+1} = \tilde{C}x_k + \tilde{D}u_k \quad (\text{A-34})$$

As matrizes $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{C}$, $\tilde{D}$ dependem do passo de tempo escolhido, e são as correspondentes discretas das matrizes A , B , C , D , respectivamente, do sistema contínuo. x_k , y_k e u_k são os valores de x , y , e u no k -ésimo instante discreto de tempo.

Ainda resta determinar as condições iniciais do sistema. Estas valem tanto para a versão discreta como para a contínua. No instante de tempo 0, são conhecidos $y(0)$, $u_1(0)$ e $u_2(0)$, e resta determinar $x_1(0)$, $x_2(0)$, $\dot{x}_1(0)$ e $\dot{x}_2(0)$. Manipulando-se as equações do sistema, é possível obter estes valores, conforme abaixo.

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -a_0 \\ 1 & -a_1 \end{pmatrix}^{a_0=0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -a_1 \end{pmatrix},$$

$$\dot{x}_1(0) = A_1 \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} + (Bu(0))_1 = (Bu(0))_1, \quad (\text{A-35})$$

$$\dot{x}_2(0) = A_2 \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} + (Bu(0))_2, \quad (\text{A-36})$$

$$y(0) = C \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} + Du(0) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} + Du(0) = x_2(0) + Du(0)$$

$$\Leftrightarrow x_2(0) = y(0) - Du(0) \quad (\text{A-37})$$

Substituindo (A-37) na equação (A-36), obtém-se

$$\dot{x}_2(0) = x_1(0) - a_1(y(0) - Du(0)) + (Bu(0))_2 \Leftrightarrow x_1(0) = \dot{x}_2(0) + a_1(y(0) - Du(0)) - (Bu(0))_2$$

Então se pode assumir que $\dot{x}_2(0) = 0$ e obter $x_1(0)$. Desta forma, as condições iniciais ficam estabelecidas.

A.6. Hipóteses Para Utilização do Controlador de Espaçamento

Por utilizar esta abordagem, o uso do algoritmo AMAAI restringe a operação TBS apenas ao modo automático de ajuste de velocidade, porque ele está projetado para uma atualização contínua da velocidade do ar calibrada (CAS), o que seria impossível de executar manualmente. Poderia ser interessante utilizar o algoritmo descrito por Ivanescu et al (2005),

que consiste em ajustar a velocidade da aeronave seguidora a valores de velocidade registrados da aeronave alvo e associados à posição atual da seguidora.

Outra diferença entre o modelo AMAAI e o algoritmo de Ivanescu et al. (2005) é que este último assume que apenas a velocidade em relação ao solo é transmitida por meio de ADS-B, ao contrário do modelo AMAAI, que assume que a velocidade verdadeira em relação ao ar (TAS) é transmitida nas mensagens ADS-B. Sobre este ponto, a norma ICAO (1999) afirma:

- *“O vetor de solo (incluindo velocidade em relação ao solo) e o vetor de ar (incluindo velocidade em relação ao ar) são opcionais nas mensagens ADS-B”; e*

- *“A única velocidade em relação ao ar disponível no vetor de ar é a Velocidade Indicada em Relação ao Ar (IAS)”.*

Tais afirmações conduzem a assumir que a implementação do modelo AMAAI exigiria que a aeronave seguidora estimasse a TAS da aeronave líder, a partir da IAS e da altitude.

Uma análise comparativa entre o algoritmo do AMAAI e o de Ivanescu (2005) poderia dar idéias valiosas para o desenvolvimento de controladores de espaçamento. Nota-se também que o algoritmo do AMAAI poderia ser adaptado para utilizar o histórico de velocidade da aeronave líder, para que se obtenha um controle mais estável e preciso. No entanto, a viabilidade de se operar ajustes de velocidade manualmente com o algoritmo do AMAAI ainda permanece desconhecida.

O algoritmo de AMAAI usa uma malha de controle em realimentação linear. Miquel et al. (2005) mostraram que controladores não-lineares proporcionam melhor desempenho, mas seu estudo não considera as características de rastreamento (ou vigilância) aerotransportado ou desempenho de tarefas pelo piloto.

As observações seguintes podem ajudar no entendimento e no desenvolvimento de algoritmos de espaçamento.

Grimaud et al. (2003) afirmam explicitamente (veja a tabela 1 da referência) que grandes ajustes na separação temporal (principalmente quando a separação corrente é menor que a separação desejada) são feitos por vetoração. Isto conduz à hipótese, nesta análise de segurança, que o espaçamento inicial é feito antes do início do espaçamento ASAS.

Outras observações interessantes, também de Grimaud et al (2005) (veja pp. 138 e 139) são: *“Os controladores preferiram espaçamento temporal (sobre espaçamento baseado em distância), em particular por causa da diminuição progressiva de distância, mas reforçaram*

a necessidade de ter critérios temporais consistentes para lidar com esteira de turbulência). Eles também mencionaram a necessidade de ter mais informação na interface (por exemplo, ‘exatamente’ ou ‘no mínimo’), em particular quando recebendo aeronaves da TMA Estendida. A instrução ‘intercalar’ foi preferida (para rotas convergentes), enquanto ‘proa e então intercalar/permanecer’ foi mencionada como exigindo monitoração demais. Foram feitas sugestões para encurtar a fraseologia”. Estas observações envolvem não somente o algoritmo de espaçamento em si, mas o desempenho de tarefas pelo operador humano.

A.7. Perfil Vertical Requerido na Aproximação

O modelo especificado em SDCPN para o estudo de caso desta tese assume as seguintes regras para o controle de altitude durante as operações de aproximação:

- a) O perfil vertical é independente do fato de a aeronave estar executando TBS ou não;
- b) O perfil vertical é controlado pelo ATCo;
- c) A altitude inicial segue uma distribuição uniforme no intervalo $[h_{\text{enter}}^{\text{MIN}}, h_{\text{enter}}^{\text{MAX}}]$. Os valores adotados como padrão, em FL, foram [90,100].
- d) O ATCo instruirá as aeronaves para ir para altitudes mais baixas de acordo com limites de proximidade da cabeceira da pista. Os limites adotados para simulação estão presentes na Tabela A-1:

Tabela A-1: Altitudes instruídas para as aeronaves durante a aproximação.

Distância horizontal em relação à cabeceira da pista (NM)	Altitude instruída (a ser atingida, em FL)
50	75
30	25
8,5	Rampa ILS

- e) A razão de descida da aeronave seguirá o modo de funcionamento do controlador TECS projetado por Van der Geest (2002).

Para exemplificar o perfil de altitude executado, uma aeronave pode entrar na E-TMA a 60 NM da cabeceira da pista, mantendo o nível 100 de vôo. Quando ela chegar a 50 NM da cabeceira da pista, o ATCo irá transmitir uma instrução para que ela vá para o nível de vôo

75. Entretanto, a aeronave aplicará uma razão de descida que fará com que ela atinja o nível de vôo 75 a uma distância de aproximadamente 40 NM da cabeceira da pista, mantendo então esta altitude. Quando a aeronave ultrapassar a linha das 30 NM da cabeceira, o controlador a instruirá para ir para o nível de vôo 25. Aplicando um perfil de descida suave, a aeronave atingirá FL 25 quando estiver a aproximadamente 12 NM da cabeceira. A partir de então, ela deve interceptar e seguir a rampa ILS de descida, o que deve ocorrer a 8,5 NM da cabeceira.

Fatores aleatórios do modelo, como diferentes tempos de execução de tarefas do controlador e do piloto, introduzem variações no perfil vertical, aproximando o modelo da realidade.

A.8. Perfil de Velocidade Requerido na Aproximação

O modelo especificado em SDCPN assume as seguintes regras para o controle de regras durante as operações de aproximação:

- a) O perfil de velocidade depende do fato de a aeronave estar executando espaçamento temporal ou não;
- b) A velocidade é controlada pelo ATCo somente no caso em que a aeronave não é seguidora em um procedimento de espaçamento temporal. Neste caso, a velocidade é regulada de acordo com limites de proximidade em relação à cabeceira da pista, de acordo com a Tabela A-2. A aeronave desacelerará suavemente para atingir a velocidade instruída, conforme o controlador TECS (VAN DER GEEST, 2002).

Tabela A-2: Velocidades instruídas para as aeronaves durante a aproximação.

Distância horizontal em relação à cabeceira da pista (NM)	Velocidade instruída (a ser atingida, em nós, em relação ao solo)
50	250
30	190

Além desses limiares de proximidade do aeroporto, a velocidade das aeronaves que não estão executando um procedimento de espaçamento temporal ASAS pode ser controlada pelo ATCo quando ela tem uma velocidade que é excessivamente maior que a velocidade da aeronave que está em frente. A porcentagem máxima de excesso tolerado é determinada pelo parâmetro c_{spacing2} ; e

- c) A velocidade inicial segue uma distribuição normal com média v_e e desvio padrão σ_v . Os valores *default* adotados foram $v_e = 310$ nós e $\sigma_v = 5$ nós.

Apêndice B. Algoritmo Sistema de Partículas Interagentes

O algoritmo utilizado para aceleração do método Monte Carlo denomina-se “Sistema de Partículas Interagentes” (IPS – *Interacting Particles System*), e este Apêndice descreve esse algoritmo e sua justificativa.

B.1. Descrição do Algoritmo IPS

O algoritmo, de acordo com a definição de Blom et al. (2005), é especificado aqui com pequenas modificações no formalismo, mas sem alteração em sua semântica, conforme segue. Cada amostra simulada, isto é, cada instância de SDCPN com um cenário completo, é denominada de partícula.

Definições

Sejam

$N_p \in \mathbb{N}$ o número de partículas utilizadas;

$m \in \mathbb{N}$ o número de níveis de filtragem;

$k \in \{1, 2, \dots, m\}$ o nível de filtragem;

T o tempo máximo de duração de uma partícula;

$\bar{D}_k$ um conjunto pertencente a uma álgebra Borel que representa um sólido convexo em torno da aeronave que está sendo analisada; Os conjuntos $\bar{D}_k$ são definidos de tal forma que $\bar{D}_k \subset \bar{D}_{k-1} \dots \subset \bar{D}_0$;

s_k^l a l -ésima partícula no k -ésimo estágio de filtragem;

ξ_k^l o estado da partícula s_k^l , representado pelo estado de uma instância de SDCPN; define-se $\xi_k^l = (t, x_k^l, \theta_k^l)$, sendo que t é o instante em que a partícula se encontra, x_k^l denota o vetor de valores assumidos pelas variáveis contínuas, e θ_k^l o vetor de valores assumidos pelas variáveis discretas;

ω_k^l o peso estatístico atribuído à partícula s_k^l ;

$p_{x_0, \theta_0}(\xi)$ a distribuição de probabilidade dos estados iniciais ξ de uma partícula;

$\gamma_k \in \mathbb{R}$ a probabilidade condicional de uma partícula qualquer atingir o conjunto $\bar{D}_k$ dado que ela atingiu o conjunto $\bar{D}_{k-1}$;

$\bar{\gamma}_k \in \mathbb{R}$ a aproximação numérica de γ_k ;

$\pi_k(s_k^l)$ a probabilidade condicional do estado ξ_k^l (da partícula s_k^l) pertencer a $\bar{D}_k$ em um instante menor que T , dado que ela atingiu $\bar{D}_{k-1}$ em um instante menor que T , com estado ξ_{k-1}^l ;

$\bar{\pi}_k(s_k^l)$ a aproximação numérica de $\pi_k(s_k^l)$;

$f_{\bar{\pi}_k}(\cdot)$ uma função que retorna uma amostra da distribuição de partículas gerada por $\bar{\pi}_k$;

$P(\tau < T)$ a probabilidade de uma partícula qualquer atingir o conjunto $\bar{D}_m$ num tempo menor que T .

Passo 0: Amostragem Inicial

- $k = 0$;
- Para $l = 1, \dots, N_p$, gere valor de estado inicial fora de $\bar{D}_1$ por sorteios independentes (x_0^l, θ_0^l) de $p_{x_0, \theta_0}(\cdot)$ e atribua $\xi_0^l = (0, x_0^l, \theta_0^l)$;
- Para $l = 1, \dots, N_p$, atribua os pesos iniciais $\omega_0^l = 1/N_p$;
- Denote a l -ésima partícula por $s_o^l = \{\xi_0^l, \omega_0^l\}$ e crie o conjunto $S_0 \leftarrow \{s_o^l\}_{l=1}^{N_p}$;

Iteração em k : $k = 1, \dots, m$

Passo 1. Predição

- Para $l = 1, \dots, N_p$, simule um novo caminho do processo de Markov híbrido da partícula $s_{k-1}^l \in S_{k-1}$, iniciando em ξ_{k-1}^l até atingir o conjunto $\bar{D}_k$ ou $t = T$. Denote por $\hat{\xi}_k^l$ o estado da partícula s_{k-1}^l ao final deste caminho.

Passo 2. Condicionamento

- Agrupe as partículas que atingiram $\bar{D}_k$ no conjunto $\hat{S}_k$: $\hat{S}_k = \{s_{k-1}^l : \hat{\xi}_k^l \in \bar{D}_k\}$;

- Renumere as partículas em $\hat{S}_k$ de forma a obter o conjunto $S_k = \{s_k^i : (\exists \hat{s}_k \in \hat{S}_k \mid s_k^i = \hat{s}_k) \wedge (s_k^i \neq s_k^j \mid j \neq i) \mid i, j \in \{1, \dots, N_{S_k}\}\}$. Este novo conjunto possui N_{S_k} elementos, e cada um destes elementos será denotado por $s_k^i = \{\xi_k^i, \omega_k^i\}$.

Passo 3. Cálculo da Fração γ_k

- Faça $\hat{s}_k^l \leftarrow \{\hat{\xi}_k^l, \hat{\omega}_k^l\}$, com $\hat{\omega}_k^l = \omega_{k-1}^l$ se $s_{k-1}^l \in S_k$ ou $\hat{\omega}_k^l = 0$ se $s_{k-1}^l \notin S_k$;
- Aproxime $\gamma_k \cong \bar{\gamma}_k = \sum_{l=1}^{N_p} \hat{\omega}_k^l$. Se $\gamma_k = 0$, o algoritmo pára sem estimativa para $P(\tau < T)$.

Passo 4. Reamostragem de π_k

- Faça a reamostragem de N_p partículas de acordo com o seguinte esquema:
 - Crie o conjunto $S'_k \leftarrow \{\}$;
 - Se $\frac{1}{2}N_p \leq N_{S_k} \leq N_p$ então:

1. Faça cópias das N_{S_k} partículas da seguinte maneira:

Para $l = 1$ até N_{S_k}

$$\omega_k'^l \leftarrow \omega_k^l \frac{N_{S_k}}{\gamma_k N_p}$$

$$S'_k \leftarrow S'_k \cup \{\{\xi_k^l, \omega_k'^l\}\};$$

2. Para $m = 1$ até $(N_p - N_{S_k})$,

- Sorteie uma partícula $s_k'^m$ independentemente da medida

$$\text{empírica } \bar{\pi}_k(s_k'^l) = \frac{\omega_k'^l}{\bar{\gamma}_k}, \text{ isto é:}$$

$$s_k'^m \leftarrow f_{\bar{\pi}_k}(\cdot), \quad \text{com } \{\xi_k'^m, \omega_k'^m\} \stackrel{\Delta}{=} s_k'^m$$

- $\omega_k^m \leftarrow \frac{1}{N_p};$
- $S'_k \leftarrow S'_k \cup \{s_k^m\};$
- Se $N_{S_k} \leq \frac{1}{2}N_p$ então:
 1. Faça cópias das N_{S_k} partículas da seguinte maneira:

Para $l = 1$ até N_{S_k}

$$\omega_k^l \leftarrow \omega_k^l \frac{N_{S_k}}{2\bar{\gamma}_k}$$

$$S'_k \leftarrow S'_k \cup \{\xi_k^l, \omega_k^l\};$$
 2. Para $m = 1$ até $(N_p - N_{S_k})$,
 - Sorteie uma partícula s_k^m independentemente da medida empírica $\bar{\pi}_k(s_k^l) = \frac{\omega_k^l}{\bar{\gamma}_k}$, isto é:

$$s_k^m \leftarrow f_{\bar{\pi}_k}(\cdot), \quad \text{com } \{\xi_k^m, \omega_k^m\} \stackrel{\Delta}{=} s_k^m$$
 - $\omega_k^m \leftarrow \frac{1}{2(N_p - N_{S_k})};$
- Faça $S_k \leftarrow S'_k$ (S_k tem agora N_p elementos);

Ao final da iteração calcule $P(\tau < T) \approx \prod_{k=1}^m \bar{\gamma}_k$

A convergência deste algoritmo acima é heurística. Cérou et al. (2002) provam que um algoritmo similar tem convergência garantida para o cálculo da probabilidade de $P(\tau < T)$. A diferença entre o IPS descrito acima e o algoritmo de Cérou et al. (2002) é que, no Passo 4, todas as partículas são reamostradas com a medida $\bar{\pi}_k(s_k^l) = \frac{\omega_k^l}{\bar{\gamma}_k}$, e seus pesos ajustados para

$\omega_k^m \leftarrow \frac{1}{N_p}$. Entretanto, foi empiricamente constatado por Blom et al. (2005) que o esquema

de reamostragem acima apresenta os mesmos resultados do algoritmo Cérou et al. (2002), com um tempo de convergência menor.

B.2. Justificativa da Aplicabilidade do Algoritmo Sistema de Partículas Interagentes

O objetivo desta seção é relatar a aplicabilidade do algoritmo de aceleração do método Monte Carlo, denominado “Sistema de Partículas Interagentes”, ao modelo de tráfego aéreo utilizado para cálculo de probabilidade de colisão. Não estão incluídas aqui todas as definições exigidas para compreender em todos os detalhes da demonstração, que depende de um extenso arcabouço matemático, que está acessível a partir das referências citadas.

Para compreender a demonstração, serão apresentadas algumas definições matemáticas básicas.

Um *processo estocástico* pode ser definido como uma família de variáveis aleatórias X_t , onde t é um parâmetro que percorre um dado conjunto de índices T . Em exemplos simples e comuns, o conjunto T corresponde a unidades discretas do tempo.

Um *Processo de Markov* $\{X_t\}_{t \in T}$ é um processo estocástico que satisfaz a seguinte condição: dado certo valor de X_t , os valores de X_s onde $s > t$ não são influenciados pelos valores de X_u onde $u < t$. Ou seja, a probabilidade de qualquer comportamento futuro, quando o estado atual é conhecido, não é alterada pelo conhecimento adicional relativo ao comportamento passado.

Um *Processo de Markov Forte* é um processo em que o futuro não depende do passado, mas apenas do instante presente, onde este presente é determinado por um *tempo de parada*. Um tempo de parada é matematicamente definido como segue. Seja $\{X_t : t = 0, 1, \dots, n\}$ uma sequência aleatória de valores. Seja $\mathcal{F}_n$ uma σ -álgebra gerada pela sequência $\{X_t : t = 0, 1, \dots, n\}$, para cada valor de n . A variável aleatória $t \in \mathbb{N}$ é um tempo de parada se o evento $\{t = n\}$ está associado a um único elemento de $\mathcal{F}_n$. Em outras palavras, é possível determinar o valor de t a partir da observação de um valor gerado na sequência X_t .

Modelagem em Espaço de Estados Híbrido

O sistema em estudo, uma aplicação de tráfego aéreo, pode ser modelado num espaço de estados híbrido: possui tanto componentes contínuas (posição, velocidade, etc.) como componentes discretas (motor funcionando ou não, equipamentos funcionando ou não).

Seja ξ_t o estado do sistema no instante t , pertencente a um *espaço de estados híbrido* $\mathbb{M} \times \mathbb{R}^{n-1}$. Então temos $\xi_t = \{\xi_{1,t}, \underline{\xi}_t\}$. A componente $\xi_{1,t}$ evolui em um conjunto discreto $\mathbb{M} = \{\eta_i : i = 1, 2, \dots, N\}$, e a componente $\underline{\xi}_t$ evolui no espaço euclidiano $\mathbb{R}^{n-1}$, e cada componente pode influenciar na evolução do outro.

Assumindo as definições de Blom et al. (2003), as componentes da equação diferencial que modela o sistema podem ser escritas nas formas:

$$d\xi_{1,t} = \int_{(0,\infty)} (\eta_i - \xi_{1,t-}) 1_{[\sum_{i=1}(\xi_{i-}), \sum_i(\xi_{i-})]}(u_1) p_p(dt, du_1 \times \mathbb{R}^d) \quad (\text{B-1})$$

$$d\underline{\xi}_t = \underline{\alpha}(\xi_t)dt + \underline{\beta}(\xi_t)dw_t + \int_{(0,\infty)} \int_{\mathbb{R}^d} \sum_{i=1}^N \underline{\phi}(\eta_i, \xi_{t-}, \underline{u}) 1_{[\sum_{i=1}(\xi_{i-}), \sum_i(\xi_{i-})]}(u_1) p_p(dt, du_1 \times d\underline{u}) \quad (\text{B-2})$$

Assumindo que:

$$\alpha_1(\xi) = 0 \quad (\text{B-3})$$

$$\beta_1(\xi) = 0 \quad (\text{B-4})$$

$$\phi_1(\eta, \xi, u) = \eta - \xi_1, \text{ para todo } \eta \in \mathbb{R} \text{ e } u \in \mathbb{R}^d. \quad (\text{B-5})$$

De (B-1), tem-se que o estado discreto depende de um processo de salto puro, de acordo com a medida aleatória de Poisson p_p . De (B-2) tem-se que o estado híbrido depende de três termos do lado direito: o primeiro termo pondera o estado atual de acordo com transições contínuas e/ou determinísticas, o segundo pondera o estado atual em relação aos processos de difusão do conjunto contínuo (como, por exemplo, ventos e possíveis ruídos nos equipamentos), e o terceiro, que representa degraus nos componentes contínuos do sistema, causados por transições disparadas por processos de Poisson que seguem a medida p_p . Estes processos representam falhas em equipamentos que podem causar alterações súbitas no estado da aeronave. Assumindo que existam N destes processos no sistema, cada $\eta_i \in \mathbb{R}$, com $i = 1, 2, \dots, N$, representa a intensidade de salto do processo.

De acordo com Blom et al (2003), assumindo as condições (B-3) a (B-5), é provado o seguinte teorema: para toda condição inicial $\xi_0(\omega) \in \mathbb{R}^n$, as equações (B-1) e (B-2) têm uma solução única $\{\xi_t\}$, a qual é contínua à direita e limitada à esquerda (“càdlàg”, do francês: “continue à droite, limite à gauche”). Mais que isso, se $\xi_0(\omega) \in \mathbb{M} \times \mathbb{R}^{n-1}$ para todo ω , com $\mathbb{M} = \{\eta_i \in \mathbb{R}; i = 1, 2, \dots, N\}$, então $\{\xi_t\}$ é um processo de Markov forte, assumindo valores no espaço híbrido $\mathbb{M} \times \mathbb{R}^{n-1}$.

O tipo de modelagem matemática desta seção permite representar muitos aspectos de um sistema de tráfego aéreo. Entretanto, ainda carece de elementos importantes.

Modelagem do Sistema Como um Processo Híbrido Estocástico Geral (GSHP)

Para se modelar um sistema de tráfego aéreo é necessário levar em consideração o fato de que o seu estado discreto pode ser alterado devido ao atingimento de fronteiras de conjuntos de valores assumidos pelas variáveis contínuas. Por exemplo, os *flaps* da aeronave são abertos quando ela está abaixo de uma determinada velocidade. Nesta situação, a força de sustentação e o arrasto mudam subitamente.

Assumindo as condições dadas (B-3) a (B-5), a solução de (B-1) e (B-2) é a mesma que a solução das seguintes equações:

$$d\xi_{1,t} = \sum_{i=1}^N (\eta_i - \xi_{1,t-}) p_P(dt, [\sum_{i=1}^N (\xi_{t-}), \sum_i (\xi_{t-})] \times \mathbb{R}^d) \quad (B-6)$$

$$d\underline{\xi}_t = \underline{\alpha}(\xi_t)dt + \underline{\beta}(\xi_t)dw_t + \int_{\mathbb{R}^d} \underline{\phi}(\xi_{1,t}, \xi_{t-}, \underline{u}) p_P(dt, [0, \Lambda(\underline{\xi}_{t-})] \times d\underline{u}) \quad (B-7)$$

Assume-se ainda que, para cada modo $\theta \in \mathbb{M}$, há um subconjunto aberto e contínuo $E^\theta \in \mathbb{R}^{n-1}$, de fronteira ∂E^θ . Considera-se a seqüência $\{\{\xi_t^i\}, i = 0, 1, \dots\}$ de processos. Então:

- $\{\xi_t^0\}$ é uma solução de (B-6) e (B-7) para $t \geq \tau_0 = 0$, com $\xi_0^0(\omega) \in \{\{\theta\} \times E^\theta; \theta \in \mathbb{M}\}$

$$\tau_1 \triangleq \inf\{t > \tau_0; \xi_t^0 \in \{\{\theta\} \times \partial E^\theta; \theta \in \mathbb{M}\}\}$$

isto é, τ_1 é o instante em que o estado ξ_t^0 atinge a fronteira de E .

- ξ_t^1 é igual a ξ_t^0 para $t = \tau_1$, e é solução de (B-6) e (B-7) para $t \geq \tau_1$, com condição inicial

$\xi_{\tau_1}^1(\omega)$ satisfazendo:

$$P\{\xi_{1,\tau_1}^1 = \{\theta, \underline{\xi}_{\tau_1}^1\} \in A^\theta \mid \xi_{\tau_1-}^0 = \xi\} = Q(\{\theta\} \times \underline{A}^\theta, \xi)$$

onde A^θ um subconjunto Borel de E^θ , e

$$Q(\{\eta\} \times \underline{A}; \xi) = \rho(\eta, \xi) \int_{\mathbb{R}^d} \mathbf{1}_{\underline{A}}(\underline{\xi} + \underline{\phi}(\eta, \xi, \underline{u})) \mu(d\underline{u})$$

onde ρ é um mapeamento mensurável de $\mathbb{R} \times \mathbb{M} \times \mathbb{R}^{n-1}$ em $[0, \infty)$, tal que $\sum_{i=1}^N \rho(\eta_i, \xi) = 1$.

Então, para $i = 1, 2, 3, \dots$, temos:

$$\tau_i \triangleq \inf\{t > \tau_{i-1}; \xi_t^i \in \{\{\theta\} \times \partial E^\theta; \theta \in M\}\}$$

- $\{\xi_t\}$ é igual a $\{\xi_t^{i-1}\}$ para $t < \tau_i$, e é solução de (B-6) e (B-7) para $t \geq \tau_i$, com condição inicial $\xi_{t_i}^i(\omega)$ satisfazendo:

$$P\{\xi_{t_i}^i = \theta, \underline{\xi}_{\tau_i}^i \in \underline{A}^\theta \mid \xi_{\tau_i-}^{i-1} = \xi\} = Q(\{\theta\} \times \underline{A}^\theta, \xi)$$

Isso significa que o estado atual ξ_t é o mesmo, independentemente se os saltos nos valores contínuos do processo ocorrem por processos de salto puro, ou se ocorrem devido ao atingimento de fronteiras. Portanto, o sistema pode ser modelado como um “processo híbrido estocástico geral” (GSHP – *General Stochastic Hybrid Process*).

A Propriedade de Markov no GSHP

Sejam ξ_τ o estado de um GSHP no instante τ , e $\mathcal{F}_t^s$ uma filtragem em distintos níveis no intervalo $[s, t]$, com $s < t$. Em (BLOM, KRYSTUL, 2005) está provado que, para qualquer tempo de parada τ determinado por $\mathcal{F}_t^s$, vale:

$$E_{s,x}(f(\xi_{\tau+\Delta}) \mid \mathcal{F}_\tau^s) = E_{\tau,\xi_\tau}(f(\xi_{\tau+\Delta})) \quad (\text{B-8})$$

Esta equação expressa que, no instante futuro $\tau + \Delta$, o estado esperado do processo iniciado no instante passado s no ponto x , dada uma filtragem $\mathcal{F}_\tau^s$ no intervalo $[s, \tau]$, é o mesmo estado esperado pelo processo iniciado no instante presente τ no ponto ξ_τ . Ou seja, o estado futuro é independente dos estados anteriores ao tempo de parada. Isto significa que um GSHP é um processo de Markov forte, fato este que permite aplicar propriedades muito interessantes desta classe de processos ao modelo em estudo.

A próxima seção apresenta um formalismo que fornece um maior poder de modelagem para representar GSHP.

Modelagem de GSHP através de SDCPN

As fórmulas apresentadas (B-6) e (B-7) são demasiado abstratas para definir sistemas complexos, como é o caso do tráfego aéreo. Por isso, outro artifício teve que ser empregado, conforme será explicado abaixo. O primeiro passo é modelar o sistema de tráfego aéreo através de uma SDCPN.

A SDCPN que modela o sistema deve estar de acordo com as seguintes condições:

- R₀: A ativação de uma transição imediata tem prioridade sobre as transições de guarda e de atraso.
- R₁: Se uma transição é permitida por dois ou mais conjuntos disjuntos de fichas (“tokens”) de entrada no mesmo tempo, então esses conjuntos serão ativados independentemente, ao mesmo tempo.
- R₂: Se uma transição é permitida por dois ou mais conjuntos não-disjuntos de fichas de entrada ao mesmo tempo, então o conjunto a ser ativado será escolhido aleatoriamente.
- R₃: Se duas ou mais transições são permitidas ao mesmo tempo por um conjunto disjunto de fichas de entrada, então serão ativadas ao mesmo tempo.
- R₄: Se duas ou mais transições são permitidas no mesmo tempo por um conjunto não-disjunto de fichas de entrada, então a transição que será ativada é selecionada aleatoriamente, com a mesma probabilidade para cada transição.
- D₁: O tempo considerado é finito.
- D₂: Após uma ativação de transição, pelo menos um local deve conter um número diferente de fichas ou a cor de pelo menos uma ficha deve ter sido mudada.
- D₃: Em um intervalo finito de tempo, é esperado que ocorra um número finito de transições.
- D₄: O início é tal que nenhuma transição imediata é permitida imediatamente.

Assumindo tais condições, tem-se o seguinte teorema provado por Everdij e Blom (2005): para qualquer “processo de Markov determinístico por pedaço” (PDP – *Piecewise Deterministic Markov Process*) é possível elaborar uma “rede de Petri dinamicamente colorida” (DCPN – *Dynamically Coloured Petri Net*) equivalente. O processo inverso, a modelagem de um PDP a partir de uma DCPN, também é válido.

Para o caso em estudo, por se tratar de um modelo complexo de modelagem, a sua construção se dá através de iterações. Primeiramente, modela-se cada agente (piloto, sistema de navegação, aeronave, etc.). Em seguida, as conexões entre os agentes são feitas e por fim, a verificação da modelagem e das condições do PDP (R0-R4, D1-D4). Caso haja algum problema, o processo retorna ao primeiro passo.

Um PDP pode ser estendido a um *processo híbrido estocástico geral* (GSHP), através da inclusão do movimento browniano em sua equação. Assim, uma modelagem similar à da DCPN passa a ser feita através de uma “rede de Petri estocástica e dinamicamente colorida” (SDCPN – *Stochastically and Dynamically Coloured Petri Net*). Feita esta extensão, é

possível verificar, de acordo com Blom e Everdij (2005), que uma SDCPN equivale a um GSHP.

Aplicabilidade do Algoritmo de Sistema de Partículas Interagentes

Conforme apresentado nas seções anteriores, o sistema de tráfego aéreo pode ser modelado adequadamente como uma SDCPN e, por isso, como um processo de Markov forte.

Por se tratar de um sistema complexo, a análise das execuções da SDCPN por meio do método Monte Carlo simples pode levar um tempo inviável de computação. Por isso, recorre-se a Krystul e Blom (2004 e 2005) para utilizar uma técnica eficiente de simular seqüências de eventos que permitam obter mais rapidamente eventos de colisão. A aplicabilidade desta técnica se fundamenta na equação (B-8). A técnica utilizada permite, ao menos teoricamente, encontrar as mesmas probabilidades de colisão que seriam obtidas pelo método Monte Carlo simples, mas num tempo muito menor.

Para realizar as simulações, foi implementado o algoritmo de partículas interagentes de Krystul e Blom (2005), em três versões diferentes (básica, híbrida e híbrida adaptativa), que fazem o cálculo da probabilidade da colisão através de subsequências de eventos. A versão IPS básica foi escolhida, pelo fato de a versão híbrida ter apresentado problemas de precisão.

Apêndice C. Detalhamento da Avaliação de Tendência e Incerteza Sobre Os Valores de Risco Obtidos em Simulações

Conforme mencionado na seção 7.4, o processo de elaboração do modelo da operação de Espaçamento Temporal Aerotransportado utilizado nesta tese resulta em uma faixa de incerteza para o valor do risco calculado para esta aplicação de tráfego aéreo. Este Apêndice detalha a aplicação da metodologia de avaliação de tendência e incerteza de Everdij e Blom (2002) ao estudo de caso realizado nesta investigação científica.

C.1. Método de Avaliação de Tendência e Incerteza

O método de Avaliação de Tendência e Incerteza de Everdij e Blom (2002) permite levar em conta todos os fatos (i) a (v) enunciados no início da seção 7.4. Entretanto, devido às limitações de recursos (tempo de dedicação de especialistas em aplicações ASAS) disponíveis para elaboração desta tese exigiram que apenas os fatos (ii) e (iii) fossem levados em conta na Avaliação de Tendência e Incerteza. Para minimizar o impacto causado pelo fato (i), as seguintes medidas foram aplicadas: utilização de geradores de números pseudo-aleatórios com período suficientemente grande (10^{223}), de modo a garantir uma distribuição pseudo-aleatória mais próxima possível de uma distribuição uniforme puramente aleatória; precisão dupla (tipo `double` da linguagem Java) em todas as variáveis de ponto flutuante; e um intervalo de integração pequeno, igual a 0,2 s, o que em parte explica o longo tempo necessário para as simulações. À parte disso, para estimar o impacto causado pelos fatos (iv) e (v), seria necessário contar com horas de trabalho de especialistas em segurança de tráfego aéreo que, além de ter vivência em operação real de aeronaves ou de controle de tráfego aéreo, devem ser conhecedores do conceito operacional de Espaçamento Aerotransportado ASAS; não foi possível contar com esta contribuição neste trabalho de pesquisa. Por estes motivos, o método de Everdij e Blom (2002) foi utilizado de forma limitada, mas criteriosa, sem que fosse comprometida a qualidade dos resultados obtidos.

C.1.1. Formulação da Avaliação de Tendência e Incerteza

Aplicando a formulação de Everdij e Blom (2002), o valor esperado $\bar{R}$ (centro do intervalo de confiança) para o risco da aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado, é obtido

a partir de $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}$, que é o valor do risco obtido por meio de simulações do modelo SDCPN, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\overline{\mathfrak{R}} = \hat{B}\hat{C}e^{(\hat{U}/8)}\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}} \quad (\text{C-1})$$

Onde:

- $\hat{B}$ é o fator de tendência devido a hipóteses de valores de parâmetros (fato (ii));
- $\hat{C}$ é o fator de tendência devido a hipóteses estruturais do modelo SDCPN (fato (iii));
- $\hat{U}$ é o fator quadrático que determina o comprimento do intervalo de incerteza devido a hipóteses de valores de parâmetros (fato (ii));

Já os extremos do intervalo $I_{95\%}$, com confiança de 95% para o valor de $\mathfrak{R}$, são:

$$I_{95\%} = \left[\hat{B}\hat{C}e^{(-\sqrt{\hat{U}})}\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}; \hat{B}\hat{C}e^{(\sqrt{\hat{U}})}\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}} \right] \quad (\text{C-2})$$

Relacionando a formulação acima com a Fig. 7-11, tem-se a faixa de incerteza inicial

$$I = \left[e^{(-\sqrt{\hat{U}})}\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}; e^{(\sqrt{\hat{U}})}\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}} \right], \text{ o fator de tendência } B_R = \hat{B}\hat{C}e^{(\hat{U}/8)}, \text{ e o fator de correção}$$

da faixa de incerteza $B_I = \hat{B}\hat{C}$.

Supõe-se a existência de n parâmetros no modelo SDCPN. Para calcular $\hat{B}$ e $\hat{U}$ são formalizados os conceitos de tendência e incerteza sobre o valor de cada parâmetro, e de sensibilidade do risco relativa a um parâmetro, conforme será visto a seguir.

Tendência e incerteza no valor de um parâmetro

Os conceitos de tendência e incerteza no valor de um parâmetro decorrem do uso do seguinte axioma:

Existem valores c_i e l_i pertencentes a $\mathbb{R}$, $l_i \in [1; \infty)$, tais que o valor do i -ésimo parâmetro está no intervalo $[c_i/l_i; c_i l_i]$ com grau de confiança de 95%. c_i é denominado como o centro do intervalo, e l_i como o comprimento do intervalo.

Seja v_i o valor do i -ésimo parâmetro assumido como hipótese no modelo SDCPN. O fator de tendência b_i sobre o valor do i -ésimo parâmetro é definido como

$$b_i = c_i / v_i \quad (\text{C-3})$$

Com $b_i \in (0, \infty)$. Usando este fator de tendência, o intervalo de 95% de confiança para o valor do i -ésimo parâmetro é $[b_i v_i / l_i; b_i v_i l_i]$.

Sensitividade do risco relativa a um parâmetro

A sensibilidade do risco $\mathfrak{R}$ em relação ao i -ésimo parâmetro indica o quanto $\mathfrak{R}$ varia devido a mudanças no valor deste parâmetro. Mais precisamente, esta sensibilidade é medida por meio de um expoente s_i tal que, se o valor do i -ésimo parâmetro é multiplicado por um fator x , então $\mathfrak{R}$ é modificado por um fator x^{s_i} .

Terminologia Qualitativa

A estimativa do comprimento do intervalo de incerteza l_i e do fator de tendência b_i é um pouco subjetiva e, por isso, necessita de uma terminologia qualitativa de auxílio. Ademais, é útil distinguir se o fator de tendência é igual, menor ou maior que 1. Por isso, convencionou-se que

$$b_i = (b_i^b)^{b_i^e} \quad (\text{C-4})$$

Onde b_i^b é a base de tendência e b_i^e é o expoente de tendência, que pode ser +1, -1 ou 0.

A terminologia qualitativa de auxílio, conforme definida em (EVERDIJ, BLOM, 2002), é apresentada na Tabela C-1. Os termos da primeira coluna dessa tabela, quando usados para a base de tendência b_i , aplicam-se à base de tendência b_i^b , e podem vir acompanhados do sinal +, indicando que o expoente b_i^e é igual a +1, ou do sinal -, indicando que b_i^e é igual a -1. Por exemplo, uma tendência Co+ indica que $b_i^b \in [3,15;6,83]$ e $b_i^e = 1$. Quando usados para a sensibilidade do risco, os termos qualitativos da Tabela C-1 podem estar acompanhados do símbolo +, indicando que a direção da mudança no valor do risco segue a direção da mudança do valor do parâmetro associado (se o valor do parâmetro aumenta, o risco aumenta), ou -, indicando que a direção da mudança no valor do risco segue a direção oposta à direção da mudança no valor do parâmetro associado. Quando os termos da Tabela C-1 são usados para tendência no valor do risco, eles podem vir acompanhados de O, indicando tendência otimista (menor valor de risco), ou P, indicando tendência pessimista (maior valor de risco).

Tabela C-1: Terminologia para a magnitude da incerteza, da tendência e da sensibilidade do risco.

Termo Qualitativo	Incerteza l_i , tendência b_i		Sensibilidade do Risco $ s_i $	
	Valor Modal	Intervalo	Valor Modal	Intervalo
Gr (Grande)	10	[6,83; ∞]	4	[2,67; ∞]
Co (Considerável)	5	[3,15; 6,83]	2	[1,33; 2,67]
Si (Significante)	2,25	[1,75; 3,15]	1	[0,67; 1,33]
Me (Menor)	1,5	[1,30; 1,75]	0,5	[0,33; 0,67]
Pe (Pequeno)	1,2	[1,13; 1,30]	0,25	[0,17; 0,33]
De (Desprezível)	1,1	[1; 1,13]	0,125	[0; 0,17]

C.2. Aplicabilidade do Método de Avaliação de Tendência e Incerteza

De acordo com o método seguido, para analisar a tendência e a incerteza devidas às hipóteses sobre valores de parâmetros (fato (ii)), o modelo precisa estar de acordo com algumas hipóteses matemáticas. Trabalha-se com combinações das hipóteses enumeradas abaixo (numeradas de H1 a H9). Tais hipóteses aplicam-se a um modelo matemático genérico utilizado para calcular risco, com n parâmetros que influenciam no comportamento do sistema dinâmico gerado pelo modelo.

- H1 Os parâmetros usados no modelo são independentes;
- H2 Se o parâmetro do i -ésimo parâmetro é substituído por outro valor, e o fator pelo qual o risco muda em consequência disto pode ser medido, então este fator é independente dos valores dados aos parâmetros de número $(i + 1)$ até n ;
- H3 A esperança (média estatística) e a variância do logaritmo natural de cada parâmetro existem no conjunto dos reais $\mathbb{R}$;
- H4 O logaritmo natural de cada parâmetro tem uma distribuição Gaussiana (em outras palavras, cada parâmetro segue uma distribuição lognormal);
- H5 Para cada parâmetro, o logaritmo natural do seguinte quociente segue uma distribuição Gaussiana: o denominador consiste no risco obtido do modelo, e o numerador consiste no risco também obtido do modelo, mas com o i -ésimo parâmetro substituído por uma variável estocástica;
- H6 Para cada parâmetro vale: se seu valor é alterado, o risco obtido do modelo deve mudar;

- H7 A esperança do logaritmo natural dos quocientes definidos na hipótese H5 pode ser decomposta como o produto de dois fatores, o primeiro dos quais é determinado pela sensibilidade do risco em relação ao i -ésimo parâmetro (cujo valor está sendo variado), e o segundo dos quais é determinado pela esperança do logaritmo natural do i -ésimo parâmetro. Esta decomposição pode ser feita de forma similar para a variância do logaritmo natural dos quocientes.
- H8 Os quocientes definidos na hipótese H5 são limitados e têm variâncias finitas;
- H9 O número de parâmetros usados tende ao infinito.

O relatório técnico (EVERDIJ, BAKKER, BLOM, 2002) apresenta a avaliação de tendência e incerteza de uma análise de risco que usou a mesma metodologia utilizada para a análise de risco da presente tese, para uma aplicação ATM com diversos elementos em comum com a aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado. No referido relatório, argumenta-se que as hipóteses H1, H3, H4, H8 e H9 são válidas. Os mesmos argumentos podem ser utilizados para validar tais hipóteses para o modelo da presente tese. Ainda de acordo com o supracitado relatório, as hipóteses H5, H6, H7 e H9 valem aproximadamente, e uma abordagem conservadora pode suprir a ausência da hipótese H2, de forma que a faixa de incerteza obtida não está subestimada. Os argumentos utilizados para chegar a esta conclusão podem ser aplicados ao presente modelo de aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado, com exceção para a hipótese H5. Por outro lado, ainda é possível assumir que o efeito causado pela ausência da hipótese H5 é contornável, pois essa hipótese tem efeito direto no tamanho da faixa de incerteza obtida; caso sejam utilizados intervalos de incerteza superestimados para os valores de parâmetros, não haverá diminuição na faixa de incerteza obtida para o risco final da aplicação.

Na presente análise de risco, o modelo referido pelas hipóteses acima é o modelo SDCPN, e o método de obtenção da probabilidade de colisão é o método Monte Carlo acelerado.

C.3. Aplicação do Método de Avaliação de Tendência e Incerteza

Esta seção apresenta a aplicação da metodologia apresentada na seção anterior ao cálculo de fatores de tendência e do intervalo de incerteza para a aplicação de Espaçamento Temporal Aerotransportado. Essa metodologia aplica-se separadamente para cada ponto do conjunto-base de simulações apresentado na Fig. 7-10. Os valores escolhidos de espaçamento requerido

($t_{\text{spacing}}^{\text{default}}$) foram de 60 s e de 45 s.

C.3.1. Avaliação de Tendência e Incerteza Devidas às Hipóteses sobre Valores de Parâmetros para Espaçamento Requerido de 60 s

Utilizando a formulação apresentada na seção C.1, faz-se preciso estimar os valores de incerteza l_i e tendência b_i para cada parâmetro. A dimensão da faixa de incerteza l_i geralmente é maior que 1 devido à falta de dados empíricos sobre a aplicação que está sob análise (o que é compreensível, pois a aplicação ainda não está funcionando na prática), e principalmente porque, mesmo com a eventual existência de tais dados, seria exigida uma análise estatística muitíssimo elaborada para estabelecer uma relação confiável entre os dados empíricos e os parâmetros do modelo. Já o fator de tendência b_i existe porque, após a realização de um conjunto extenso de simulações, observou-se que o valor v_i (do i -ésimo parâmetro) utilizado nestas simulações não representava o centro do intervalo de confiança para o valor deste parâmetro. Por isso, para não desperdiçar o grande esforço computacional despendido nas simulações, estima-se e aplica-se o fator de tendência b_i . Fatores de tendência não neutros (diferentes de 1) devem ser usados muito criteriosamente, para não impactar a validade da hipótese H7 enunciada na seção C.2.

Tendo-se estimado l_i e b_i para cada parâmetro, é necessário calcular a respectiva sensibilidade do risco s_i relativa à variação nos valores destes parâmetros. Este cálculo é deduzido a partir das hipóteses H4 e H5 da seção C.2, e pode ser feito por meio de uma das fórmulas abaixo:

$$s_i^* = \frac{\ln\left(\frac{\Re_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, b_i l_i v_i, \dots, v_n)}{\Re_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)}\right)}{\ln(b_i l_i)} \quad (\text{C-5})$$

$$s_i^{**} = \frac{\ln\left(\frac{\Re_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, b_i / l_i v_i, \dots, v_n)}{\Re_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)}\right)}{\ln(b_i / l_i)} \quad (\text{C-6})$$

O denominador $\Re_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n)$ é o valor-base calculado para o risco por meio de simulações Monte Carlo do modelo SDCPN, já referido mais sucintamente como $\Re_{\text{SDCPN}}$. Os numeradores $\Re_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, b_i l_i v_i, \dots, v_n)$ e $\Re_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, b_i / l_i v_i, \dots, v_n)$ das fórmulas de s_i^* e s_i^{**} representam o valor do risco calculado por meio de simulações Monte Carlo do modelo SDCPN, mas com os valores do i -ésimo parâmetro, respectivamente, nos extremos superior ($b_i l_i v_i$) e inferior ($b_i / l_i v_i$) do seu intervalo de confiança. Para se obter resultados mais conservadores nesta avaliação de tendência e incerteza, procurou-se escolher entre s_i^* e s_i^{**} de forma que seja utilizado o extremo do intervalo de confiança que seja mais pessimista para a segurança da aplicação modelada.

Para calcular $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, b_i l_i v_i, \dots, v_n)$ ou $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}(v_1, \dots, b_i / l_i v_i, \dots, v_n)$, utiliza-se o mesmo software de simulação Monte Carlo utilizado para se calcular $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}$, cujas características de desempenho estão descritas na seção 7.2. Isto significa que, para cada parâmetro sob avaliação, são necessárias em torno de 50 horas de simulação (10 execuções de 5 horas cada). Além do alto custo em tempo computacional, o software de simulação necessita de, no mínimo, 2 Giga-Bytes de memória RAM, o que torna muito difícil o uso de computadores que compartilhem a memória entre processos de diversos usuários. Dadas estas limitações, procurou-se embutir, de maneira geral, uma pequena tendência pessimista para os valores de todos os parâmetros, e selecionar para análise os parâmetros que sejam considerados mais relevantes. Os critérios de seleção de parâmetros por relevância foram:

- R1 O parâmetro tem uma relação clara com a separação entre as aeronaves;
- R2 O parâmetro tem um impacto direto no tempo gasto pelos operadores humanos para realizar tarefas consideradas críticas;
- R3 O parâmetro tem um impacto direto no tempo gasto pelos operadores humanos para tomar decisões;
- R4 O parâmetro tem uma influência clara na manutenção da consciência situacional dos agentes; e
- R5 O parâmetro tem uma influência clara nos enlaces de comunicação entre os agentes.

A relação dos parâmetros escolhidos segundo estes critérios, com seus valores nominais v_i e a classificação dos respectivos intervalos de incerteza l_i , fatores de tendência b_i , e dos valores calculados de sensibilidade de risco s_i e de tendência do risco $b_i^{|s_i|}$, é apresentada na Tabela C-2, ordenada pelo módulo da sensibilidade, de maneira decrescente, utilizando a terminologia qualitativa da Tabela C-1. Na coluna referente à Unidade de medida, o traço ('-') indica que não se aplica nenhuma unidade de medida. Para as colunas referentes às tendências b_i e $b_i^{|s_i|}$, o traço significa que não existe tendência no valor do parâmetro (ou seja, $b_i = 1$ e $b_i^{|s_i|} = 1$).

Tomando um exemplo da Tabela C-2, a interpretação deve ser feita da seguinte forma: o parâmetro σ_v tem o valor nominal de 5 nós, que foi utilizado no modelo SDCPN para obtenção do risco apresentado na Fig. 7-10, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s. Existe uma incerteza Menor (Me) sobre o valor deste parâmetro, o que significa que, na aplicação real de Espaçamento Temporal Aerotransportado, ele pode estar entre 7,5 nós e 3,3 nós (de acordo com o valor

modal de $l_i = 1,5$ para a classe Menor da Tabela C-1). Fazendo a simulação Monte Carlo com $\sigma_v = 7,5$ nós, observou-se uma variação grande no valor de $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}$, que aumentou 11,7 vezes em relação ao valor da Fig. 7-9. Esta variação foi maior que a variação observada para $\sigma_v = 3,3$ nós, o outro extremo do intervalo de confiança de σ_v e, por isso, o fator 11,7 foi usado para o cálculo da sensibilidade s_i . Utilizando-se a definição de sensibilidade (seção C.1.1), foi obtido $s_i = \ln(11,7)/\ln(1,5) = 6,06$. Sendo assim, procurou-se em qual faixa de sensibilidade da Tabela C-1 o valor de $|s_i| = 6,06$ está contido. A faixa encontrada é classificada como Grande (Gr) e, como o sinal de $s_i = 6,06$ é positivo, acrescentou-se o sinal + ao termo de sensibilidade, obtendo-se Gr+ para a sensibilidade s_i . Além disso, observa-se na Tabela C-2 que não há tendência no valor de σ_v (mais precisamente, a tendência é neutra, ou seja, $b_i=1$), e conseqüentemente não há tendência induzida no risco $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN}}$ devida ao valor de σ_v .

A Tabela C-2 é utilizada para calcular os fatores $\hat{B}$ e $\hat{U}$ das fórmulas (C-1) e (C-2), utilizando as fórmulas abaixo, apresentadas em (EVERDIJ, BLOM, 2002):

$$\hat{U} = \sum_{i \notin S_{\text{qn}}^u} [\ln(f_{\text{Ne}})]^2 + \sum_{i \in S_{\text{qn}}^u} [\ln(l_i^{|s_i|})]^2 \quad (\text{C-7})$$

$$\hat{B} = \prod_{i \notin S_{\text{qn}}^u} (f_{\text{Ne}})^{d_i} \times \prod_{i \in S_{\text{qn}}^u} b_i^{s_i} \quad (\text{C-8})$$

Nessas equações, f_{Ne} denota o valor modal da classe Desprezível (vide Tabela C-1), e S_{qn}^u denota o conjunto de índices de parâmetros que foram incluídos na Tabela C-2. O número destes parâmetros é 23 (que atendem aos critérios R1-R5 enunciados acima), dentre um total de 128 parâmetros sujeitos a incerteza no modelo, de acordo com o Apêndice Q de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006). Isto significa que o número de parâmetros que não pertence a S_{qn}^u é de 105. O expoente d_i da fórmula (C-8) refere-se à tendência que a hipótese sobre o valor do i -ésimo parâmetro, que não pertence a S_{qn}^u , tem no risco obtido no modelo, assumindo um dos seguintes valores:

$$d_i = \begin{cases} +1 & \text{para uma hipótese otimista para o risco} \\ 0 & \text{para uma hipótese neutra para o risco} \\ -1 & \text{para uma hipótese pessimista para o risco} \end{cases}$$

Na presente avaliação, foi assumido $d_i = 0 \forall i \notin S_{\text{qn}}^u$, justamente por se considerar que os parâmetros fora de S_{qn}^u são de pouca relevância para o risco.

Tabela C-2: Relação de tendências, incertezas e sensibilidades associadas a cada parâmetro selecionado para avaliação, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s.

Param.	Unidade	Explicação	Valor nominal v_i	Tendência b_i	Incerteza l_i	Sensitividade do risco s_i	Tendência do risco $b_i^{s_i}$
σ_v	nós	Desvio padrão da diferença entre a velocidade de entrada de uma aeronave no setor, e a velocidade requerida para sua entrada	5	-	Me	Gr+	-
$\mu_{\text{ATCo}}^{\text{Mon}}$	s	Tempo médio gasto pelo ATCo em um estágio de tarefa de monitoração de uma aeronave (<i>Monitoring</i> – vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.8)	1	-	Me	Co+	-
$\mu_{\text{ATCo}}^{\text{MEx}}$	s	Tempo médio gasto pelo ATCo para realizar um estágio de tarefa de monitoração de execução (<i>Monitoring Execution</i> – vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.8)	2	-	Me	Co+	-
σ_x^{ver}	m	Desvio padrão da altitude calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, em relação à altitude real	10	-	Si	Si+	-
σ_v^{ver}	m/s	Desvio padrão da velocidade vertical calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave em relação à velocidade vertical real	0,1	-	Si	Si+	-
b	$\text{m}\sqrt{s}$	Nível de ruído no cálculo da altitude pelo sistema de instrumentação da aeronave	0,1	-	Si	Si+	-
c_2	$\text{m/s}\sqrt{s}$	Nível de ruído no cálculo da velocidade TAS pelo sistema de instrumentação da aeronave	0.05	-	Si	Si+	-
$p_{\text{ASAS}}^{\text{fail}}$	-	Probabilidade de o módulo de cálculo do espaçamento ASAS estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas desse módulo	5×10^{-5}	-	Si	Si+	-
σ_x^{GPS}	m	Desvio padrão da posição da aeronave, calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, com uso do GPS, em relação à posição real da aeronave	20	-	Me	Si+	-

Param.	Unidade	Explicação	Valor nominal v_i	Tendência b_i	Incerteza l_i	Sensitividade do risco s_i	Tendência do risco $b_i^{ s_i }$
σ_1	m/s	Desvio padrão da velocidade verdadeira em relação ao ar (TAS – <i>True AirSpeed</i>), calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, e a velocidade TAS real	1	-	Me	Si+	-
p_{RT}^{down}	-	Probabilidade de o equipamento de rádio da aeronave estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste equipamento	3×10^{-5}	-	Si	Me+	-
μ_{PF}^{Mon}	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Operador (PF) em um estágio de tarefa de monitoração (<i>Monitoring</i> – vide seção 6.3.2.4)	1	-	Si	Me+	-
$\mu_{PF,G5}^{MDE1}$	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Operador (PF) para realizar um estágio de tarefa de monitoração e decisão (<i>Monitoring and Decision</i> vide seção 6.3.2.4), para a meta de alteração da trajetória horizontal (<i>Horizontal Navigation</i>)	3	-	Si	Me+	-
μ_{PNF}^{Mon}	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Monitorador (PNF) em um estágio de tarefa de monitoração (<i>Monitoring</i> – vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.5)	2	-	Si	Me+	-
p_{GRT}^{down}	-	Probabilidade de o sistema de rádio do ATC estar em falha quando a aeronave líder entra no setor; tem influência também na taxa de falhas do sistema de rádio do ATC	8×10^{-5}	-	Gr	Pe+	-
$p_{ADS,REC}^{down}$	-	Probabilidade de o receptor ADS-B estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste receptor	5×10^{-4}	-	Gr	De	-
$p_{ADS,TRM}^{down}$	-	Probabilidade de o transmissor ADS-B estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste transmissor	5×10^{-4}	-	Gr	De	-

Param.	Unidade	Explicação	Valor nominal v_i	Tendência b_i	Incerteza l_i	Sensitividade do risco s_i	Tendência do risco $b_i^{s_i}$
$p_{\text{GRS}}^{\text{down}}$	-	Probabilidade de o sistema de vigilância do ATC em solo estar em falha quando a aeronave líder entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste sistema	5×10^{-5}	-	Gr	De	-
τ_{refresh}	s	Intervalo de tempo após o qual o ATCo precisa atualizar as informações de sua consciência situacional sobre o estado de uma aeronave, olhando na tela de radar com foco na etiqueta de uma aeronave	10	-	Si	De	-
σ_v^{GPS}	m/s	Desvio padrão da velocidade em relação ao solo, calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, com uso do GPS, em relação à velocidade real da aeronave em relação ao solo	2	-	Me	De	-
$\mu_{\text{PF,G3}}^{\text{MDE1}}$	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Operador (PF) em um estágio de tarefa de monitoração e decisão (<i>Monitoring and Decision</i> vide seção 6.3.2.4), para a meta de ajuste manual de velocidade (<i>Manual Speed Adjustment</i>)	3	-	Me	De	-
$\mu_{\text{PNF}}^{\text{MD2E}}$	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Monitorador (PNF) em um estágio de tarefa de monitoração e decisão (<i>Monitoring and Decision</i> vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.5), para a meta de definição do espaçamento (<i>Spacing Setting</i>)	10	-	Me	De	-
$\mu_{\text{ATCo}}^{\text{EXEINSTR}}$	s	Tempo médio gasto pelo ATCo para transmitir uma instrução a uma aeronave pelo canal de rádio	8	Me-	De	De	Si,P

Obs.: A tendência de $\mu_{\text{ATCo}}^{\text{EXEINSTR}}$ foi observada a partir dos valores apresentados na referência (MONTICONE, SNOW, WANG, 2006)

O resultado numérico da aplicação da fórmula (C-7), que determina o fator de incerteza $\hat{U}_{60}$ (o índice 60 representa que o fator calculado se refere a $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60\text{s}$) para os valores que geraram a Tabela C-2 é:

$$\hat{U}_{60} = 8,44145 \quad (\text{C-9})$$

E o resultado da aplicação da fórmula (C-8), que determina o fator de tendência $\hat{B}_{60}$, é:

$$\hat{B}_{60} = 0,494715 \quad (\text{C-10})$$

Observe que, para o caso de $\hat{B}_{60}$, apenas o parâmetro $\mu_{\text{ATCo}}^{\text{EXEINSTR}}$ tem influência. Isto é um indicativo da importância do tempo de transmissão de uma instrução vocal por rádio tem no risco da aplicação.

Até este ponto, foi calculado o fator de incerteza $\hat{U}_{60}$ e o fator de tendência $\hat{B}_{60}$. Entretanto, a dimensão final do intervalo de incerteza, e seu valor central, ainda necessitam do fator $\hat{C}_{60}$ para ser calculado.

C.3.2. Avaliação de Tendência e Incerteza Devidas às Hipóteses Estruturais do Modelo para Espaçamento Requerido de 60 s

Após terem sido executadas as simulações necessárias para construir a Tabela C-2, que demandaram um grande número de horas de computação, foi feita uma análise minuciosa dos cenários com aeronaves que colidiram, e detectou-se uma hipótese estrutural do modelo que tinha forte influência no cálculo do risco. Esta hipótese causou uma discrepância entre a representação no modelo SDCPN da aplicação aqui estudada e o conceito operacional real da aplicação. Explicando de uma maneira simplificada, esta hipótese significa:

(Hipótese Estrutural 1) *Num dado instante t_c , o conhecimento que o ATCo tem sobre a posição de cada aeronave é atualizada, por observação da tela de radar, em momento distinto à atualização do conhecimento sobre a posição das outras aeronaves, ou seja: no instante t_c , em que o ATCo tenta detectar um conflito de espaço aéreo, a posição da aeronave A sobre a qual ele está ciente foi observada no instante t_a , enquanto que a posição da aeronave B sobre a qual ele está ciente foi observada no instante t_b , sendo que $t_a \neq t_b$.*

Esta hipótese é consequência direta de hipóteses enunciadas na seção P.2.6.2 de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006), e por sua vez está subjacente à definição formal das LPNs *Task Performance ATCo* e *ATCo Situational Awareness about Aircraft i* (vide seção 6.3.2.8 no

texto principal desta tese e também seções O.2 e O.3 de (OLIVEIRA, BAKKER, BLOM, 2006)).

A razão da influência que esta hipótese tem no risco calculado é a seguinte. A análise detalhada dos cenários em que houve colisão de aeronaves mostrou que a maior parte das colisões acontecia por causa de erros na consciência situacional do Agente ATCo. Estes erros consistiam no fato de que o conhecimento que o Agente ATCo tinha sobre a posição de cada aeronave, no momento em que buscava por conflito de espaço aéreo, refletia posições não atualizadas corretamente em sua consciência situacional. No caso médio do grande número de cenários gerados inicialmente pelo método Monte Carlo, os erros no conhecimento das posições não aparentam ser relevantes para a execução dos cenários. Entretanto, conforme se aplicam os filtros e replicações de partículas (vide seção 7.1.2), os erros filtrados e replicados são observados em grande quantidade e com considerável magnitude. Para exemplificar, situações comumente encontradas de diferença de atualização entre posições de aeronaves, em instantes prévios à colisão de aeronaves, tinham defasagem em torno de 30 segundos, de acordo com a Fig. C-1.

Fig.C-1: Exemplo de erro extremo no conhecimento que o ATCo tem sobre as posições das aeronaves.

Isto significa que o ATCo olhou a posição da aeronave líder (no instante t_b) 30 segundos depois de ter olhado a posição da aeronave seguidora (no instante t_a), sem ter feito posterior atualização do conhecimento da posição da aeronave seguidora. Dessa forma, o ATCo infere (no instante t_c) que a aeronave seguidora está distante da aeronave líder (quando na verdade não está), e demora demais para emitir uma instrução de desvio da aeronave seguidora.

Uma análise conscienciosa sobre esta situação permite negar que ela possa ocorrer na prática, pois a comparação da posição horizontal das aeronaves é feita pelo ATCo num só instante, por meio de se olhar a imagem da tela radar com as posições das duas aeronaves simultaneamente. Essa situação só ocorreria em caso de um erro muito específico no sistema

que gera as imagens exibidas para o ATCo, o que está fora de consideração no presente estudo.

Por isso, foi feita uma segunda versão do modelo SDCPN, igual à primeira versão em todas as características, exceto as características relacionadas com a Hipótese Estrutural 1, tendo esta sido substituída pela Hipótese Estrutural 1' conforme enunciada abaixo:

(Hipótese Estrutural 1') *Para efeitos de detecção de conflito, o ATCo atualiza sua consciência situacional sobre as posições horizontais das aeronaves simultaneamente para cada par de aeronaves em seu setor.*

Sendo assim, na nova versão do modelo, o conhecimento que o ATCo tem sobre as posições das aeronaves é feito simultaneamente para o par líder-seguidora, não havendo defasagem de atualização entre as trilhas de cada aeronave. O resultado do risco obtido das simulações Monte Carlo com esta nova versão do modelo foi consideravelmente menor que a versão inicial, igual a $6,02 \times 10^{-11}$, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s. A razão entre este novo valor do risco, e o valor obtido no conjunto-base de simulações determina $\hat{C}_{60}$. Sendo assim,

$$\hat{C}_{60} = 0,127218 \quad (\text{C-11})$$

C.3.3. Composição dos Fatores de Tendência e Incerteza para Espaçamento Requerido de 60 s

A composição dos fatores $\hat{B}_{60}$, $\hat{C}_{60}$ e $\hat{U}_{60}$, utilizando as fórmulas (C-1) e (C-2), determina o valor esperado $\overline{\mathfrak{R}}_{60}$ do risco, e o intervalo $I_{95\%,60}$ com grau de confiança 95% para o valor do risco $\mathfrak{R}_{60}$. Dessa forma, obtém-se:

$$\overline{\mathfrak{R}}_{60} = 2,78 \times 10^{-10} \quad (\text{C-12})$$

$$I_{95\%,60} = [4,59 \times 10^{-12}; 1,81 \times 10^{-9}] \quad (\text{C-13})$$

A representação gráfica do valor esperado $\overline{\mathfrak{R}}_{60}$ do risco e do intervalo de confiança $I_{95\%,60}$ é apresentada na Fig. C-2.

Os próximos passos da avaliação de tendência e incerteza determinam o intervalo de confiança para $\mathfrak{R}_{45}$.

Fig. C-2: Representação gráfica do intervalo de confiança para o valor de risco $\mathcal{R}_{60}$.

C.3.4. Avaliação de Tendência e Incerteza Devidas às Hipóteses sobre Valores de Parâmetros para Espaçamento Requerido de 45 s

A avaliação de tendência e incerteza devidas às hipóteses sobre valores de parâmetros, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s, foi feita de forma similar à avaliação para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 60$ s (acima apresentada) mas, no entanto, algumas hipóteses foram modificadas para diminuir o comprimento do intervalo de confiança do risco.

Em primeiro lugar, a Hipótese Estrutural 1 foi removida e substituída pela Hipótese Estrutural 1'; feito isso, o parâmetro ao qual o risco se demonstrou mais sensível na Tabela C-2, σ_v , foi assumido como tendo o valor nominal de 7,5 nós, que é o extremo crítico para a segurança, para que ele pudesse ser excluído da avaliação quantitativa de incerteza, sem causar tendência otimista; por fim, para o parâmetro $\mu_{\text{ATCo}}^{\text{EXEINSTR}}$, que estava causando tendência pessimista no risco, foi assumido o valor nominal de 6 s, com uma faixa de incerteza considerada Pequena. Os resultados das simulações para análise de sensibilidade dos parâmetros estão apresentadas na Tabela C-3.

A Tabela C-3 possibilita calcular os fatores $\hat{B}_{45}$ e $\hat{U}_{45}$, da mesma maneira como foi feito para $\hat{B}_{60}$ e $\hat{U}_{60}$. Os resultados são:

$$\hat{U}_{45} = 4,156635 \quad (\text{C-14})$$

$$\hat{B}_{45} = 1,68132 \quad (\text{C-15})$$

C.3.5. Avaliação de Tendência e Incerteza Devidas às Hipóteses Estruturais do Modelo para Espaçamento Requerido de 45 s

Conforme explicado na seção C.3.2, a Hipótese Estrutural 1' foi assumida no lugar da Hipótese Estrutural 1. Dessa forma, foi obtido um novo valor para o risco obtido por meio de simulação Monte Carlo do modelo SDCPN, com $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s. Este novo valor é denotado por

$\mathfrak{R}'_{\text{SDCPN},45}$:

$$\mathfrak{R}'_{\text{SDCPN},45} = 2,81 \times 10^{-9} \quad (\text{C-16})$$

Por isso, assume-se o valor de $\mathfrak{R}'_{\text{SDCPN},45}$, no lugar de $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN},45}$, que é o valor obtido no conjunto-base de simulações, para determinação do intervalo de confiança $I_{95\%,45}$ e do valor esperado $\overline{\mathfrak{R}}_{45}$ do risco. Dessa forma, torna-se desnecessário o uso do fator $\hat{C}_{45}$, ou mais precisamente $\hat{C}_{45} = 1$. Esta escolha foi feita porque o valor $\mathfrak{R}'_{\text{SDCPN},45}$ apresenta diferença em relação a $\mathfrak{R}_{\text{SDCPN},45}$ não apenas devida às hipóteses estruturais, mas também devida às hipóteses sobre valores de parâmetros, as quais estão explicadas na seção C.3.4.

Tabela C-3: Relação de tendências, incertezas e sensibilidades associadas a cada parâmetro selecionado para avaliação, para $t_{\text{spacing}}^{\text{default}} = 45$ s.

Param.	Unidade	Explicação	Valor nominal v_i	Tendência b_i	Incerteza l_i	Sensitividade do risco s_i	Tendência do risco $b_i^{s_i}$
$\mu_{\text{PNF}}^{\text{MD2E}}$	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Monitorador (PNF) em um estágio de tarefa de monitoração e decisão (<i>Monitoring and Decision</i> vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.5), para a meta de definição do espaçamento (<i>Spacing Setting</i>)	10	-	Me	Gr+	-
$\mu_{\text{PF,G3}}^{\text{MDE1}}$	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Operador (PF) em um estágio de tarefa de monitoração e decisão (<i>Monitoring and Decision</i> vide seção 6.3.2.4), para a meta de ajuste manual de velocidade (<i>Manual Speed Adjustment</i>)	3	-	Me	Co+	-
$\mu_{\text{ATCo}}^{\text{EXEINSTR}}$	s	Tempo médio gasto pelo ATCo para transmitir uma instrução a uma aeronave pelo canal de rádio	6	-	Pe	Co+	-
σ_x^{ver}	m	Desvio padrão da altitude calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, em relação à altitude real	10	-	Si	Si+	-
$\mu_{\text{ATCo}}^{\text{Mon}}$	s	Tempo médio gasto pelo ATCo em um estágio de tarefa de monitoração de uma aeronave (<i>Monitoring</i> – vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.8)	1	-	Me	Si+	-
σ_1	m/s	Desvio padrão da velocidade verdadeira em relação ao ar (TAS – <i>True AirSpeed</i>), calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, e a velocidade TAS real	1	-	Me	Si+	-
σ_x^{GPS}	m	Desvio padrão da posição da aeronave, calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, com uso do GPS, em relação à posição real da aeronave	20	-	Me	Si+	-
$p_{\text{ASAS}}^{\text{fail}}$	-	Probabilidade de o módulo de cálculo do espaçamento ASAS estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas desse módulo	5×10^{-5}	-	Si	Me+	-

Param.	Unidade	Explicação	Valor nominal v_i	Tendência b_i	Incerteza l_i	Sensitividade do risco s_i	Tendência do risco $b_i^{s_i}$
b	$m\sqrt{s}$	Nível de ruído no cálculo da altitude pelo sistema de instrumentação da aeronave	0,1	-	Si	Me+	-
μ_{PF}^{Mon}	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Operador (PF) em um estágio de tarefa de monitoração (<i>Monitoring</i> – vide seção 6.3.2.4)	1	-	Si	Me+	-
p_{GRT}^{down}	-	Probabilidade de o sistema de rádio do ATC estar em falha quando a aeronave líder entra no setor; tem influência também na taxa de falhas do sistema de rádio do ATC	8×10^{-5}	-	Gr	Pe+	-
$p_{ADS,REC}^{down}$	-	Probabilidade de o receptor ADS-B estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste receptor	5×10^{-4}	-	Gr	Pe+	-
σ_v^{ver}	m/s	Desvio padrão da velocidade vertical calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave em relação à velocidade vertical real	0,1	-	Si	Pe+	-
$\mu_{PF,G5}^{MDE1}$	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Operador (PF) para realizar um estágio de tarefa de monitoração e decisão (<i>Monitoring and Decision</i> vide seção 6.3.2.4), para a meta de alteração da trajetória horizontal (<i>Horizontal Navigation</i>)	3	-	Si	Pe+	-
μ_{PNF}^{Mon}	s	Tempo médio gasto pelo Piloto Monitorador (PNF) em um estágio de tarefa de monitoração (<i>Monitoring</i> – vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.5)	2	-	Si	Pe+	-
μ_{ATCo}^{MEx}	s	Tempo médio gasto pelo ATCo para realizar um estágio de tarefa de monitoração de execução (<i>Monitoring Execution</i> – vide seções 6.3.2.4 e 6.3.2.8)	2	-	Me	Pe+	-
c_2	$m/s\sqrt{s}$	Nível de ruído no cálculo da velocidade TAS pelo sistema de instrumentação da aeronave	0,05	-	Si	Pe+	-

Param.	Unidade	Explicação	Valor nominal v_i	Tendência b_i	Incerteza l_i	Sensitividade do risco s_i	Tendência do risco $b_i^{ s_i }$
τ_{refresh}	s	Intervalo de tempo após o qual o ATCo precisa atualizar as informações de sua consciência situacional sobre o estado de uma aeronave, olhando na tela de radar com foco na etiqueta de uma aeronave	10	-	Si	Pe-	-
$p_{\text{ADS,TRM}}^{\text{down}}$	-	Probabilidade de o transmissor ADS-B estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste transmissor	5×10^{-4}	-	Gr	De	-
$p_{\text{GRS}}^{\text{down}}$	-	Probabilidade de o sistema de vigilância do ATC em solo estar em falha quando a aeronave líder entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste sistema	5×10^{-5}	-	Gr	De	-
$p_{\text{RT}}^{\text{down}}$	-	Probabilidade de o equipamento de rádio da aeronave estar em falha quando a aeronave entra no setor; tem influência também na taxa de falhas deste equipamento	3×10^{-5}	-	Si	De	-
σ_v^{GPS}	m/s	Desvio padrão da velocidade em relação ao solo, calculada pelo sistema de instrumentação da aeronave, com uso do GPS, em relação à velocidade real da aeronave em relação ao solo	2	-	Me	De	-

C.3.6. Composição dos Fatores de Tendência e Incerteza para Espaçamento Requerido de 45 s

A composição dos fatores $\hat{B}_{45}$, $\hat{C}_{45}$ e $\hat{U}_{45}$, utilizando as fórmulas (C-1) e (C-2) e o novo valor $\mathcal{R}'_{\text{SDCPN},45}$, determina o valor esperado $\overline{\mathcal{R}}_{45}$ do risco, e o intervalo $I_{95\%,45}$ com grau de confiança 95% para o valor do risco $\mathcal{R}_{45}$. Dessa forma, obtém-se:

$$\overline{\mathcal{R}}_{45} = 7,93 \times 10^{-9} \quad (\text{C-17})$$

$$I_{95\%,60} = [6,14 \times 10^{-10}; 3,62 \times 10^{-8}] \quad (\text{C-18})$$

A representação gráfica do valor esperado $\overline{\mathcal{R}}_{45}$ do risco e do intervalo de confiança $I_{95\%,45}$ é apresentada na Fig. C-3.

Fig. C-3: Representação gráfica do intervalo de confiança para o valor de risco $\mathcal{R}_{45}$.