Rafael Tsuji Matsuyama

**AVALIAÇÃO DE RISCO EM OPERAÇÕES DE POUSO DE
AERONAVES EM PISTAS PARALELAS UTILIZANDO
PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS CSPA**

São Paulo

2011

Rafael Tsuji Matsuyama

**AVALIAÇÃO DE RISCO EM OPERAÇÕES DE POUSO DE
AERONAVES EM PISTAS PARALELAS UTILIZANDO
PROCEDIMENTOS E TÉCNICAS CSPA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Sistemas Digitais

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Sérgio Cugnasca

São Paulo

2011

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

São Paulo, 27 de julho de 2011

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Matsuyama, Rafael Tsuji

Avaliação de risco em operações de pouso de aeronaves em pistas paralelas utilizando procedimentos e técnicas CSPA – Edição Revisada / R.T. Matsuyama. -- São Paulo, 2011. 133 p.

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

1.Tráfego aéreo (Segurança) 2.Método Monte Carlo 3.Análise de risco 4.Simulação de sistemas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

*Dedico este trabalho à minha família:
Adilson, Nilda e Daniel Matsuyama*

*“Only two things are infinite, the universe and human stupidity,
and I'm not sure about the former”.
(Albert Einstein, 1879 - 1955)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Orientador deste trabalho, Prof. Dr. Paulo Sérgio Cugnasca, pela paciência, atenção e objetividade dedicadas na orientação ao longo deste trabalho de pesquisa.

Ao meu pai Adilson, a minha mãe Nilda e ao meu irmão Daniel por todo o apoio e amor prestados para a concretização deste trabalho.

À Profa. Dra. Selma Shin Shimizu Melnikoff e ao Prof. Dr. Jorge Kinoshita, por terem dedicado tempo em conversar comigo e compartilharem de suas grandes experiências.

Ao especialista Bemildo Ferreira por toda a sua atenção e disponibilidade em compartilhar sua grande experiência na área de *Safety* e Tráfego Aéreo.

Finalmente, aos pesquisadores e professores do Grupo de Análise de Segurança (GAS), grupo de pesquisa ao qual pertenço, em cuja convivência não apenas agregou a mim conhecimentos acadêmicos, como possibilitou que eu crescesse profissional e pessoalmente.

RESUMO

Historicamente, os sistemas de tráfego aéreo incorporaram níveis de automação nas atividades de controle do espaço aéreo com o intuito de atender à crescente demanda por serviços aéreos e de melhorar os níveis de segurança nos procedimentos de voo. Com o crescimento expressivo previsto para os próximos anos, devido ao aumento nos números de voos e de usuários, as opções tradicionais de expansão da malha aérea e / ou construção de novos aeroportos se tornaram onerosas economicamente, tornando necessária a adoção de alternativas, tais como as técnicas / procedimentos para pousos em pistas paralelas, como forma de aproveitar parte da atual infraestrutura aeroportuária existente, sem a necessidade de enormes aportes financeiros. Para avaliar a viabilidade de projetos de pousos simultâneos em pistas paralelas, um dos fatores importantes a serem analisados é o da avaliação do risco de colisão entre aeronaves associado durante esses procedimentos. Nesse cenário, este trabalho de pesquisa propõe uma extensão no modelo de avaliação de segurança de Ogata para procedimentos de pouso em pistas paralelas, considerando que o modelo original tem o objetivo de medir o nível de risco associado somente para operações de pouso convencionais em pistas paralelas. A extensão deste modelo ocorre no sentido de também permitir a simulação em outros cenários distintos de pouso, o que torna possível tanto a realização de comparativos entre técnicas / procedimentos utilizadas em operações de pouso em pistas paralelas, quanto a avaliação do nível de risco associado. Este modelo estendido de segurança utiliza o método de Monte Carlo, da mesma forma que o original, em que um número elevado de simulações de cenários possíveis de pousos em pistas paralelas é avaliado. Com os resultados obtidos, é analisado o impacto da variação da distância entre as pistas na segurança de pousos em pistas paralelas.

Palavras-chave: Análise de Risco, Método de Monte Carlo, Simulação de Sistemas e Tráfego Aéreo.

ABSTRACT

Historically, air traffic control systems have incorporated some levels of automation to manage procedures of airspace control in order to meet the growing demand for air transportation services and to improve levels of safety in flight procedures. With significant growth expected in the coming years due to an increase in numbers of flights and passengers, the traditional options of expanding the air traffic network and / or construction of new airports have become economically burdensome, requiring the adoption of alternatives such as techniques / procedures for landings on parallel runways as a way of taking advantage of part of the current airport infrastructure, without requiring enormous financial contributions. To assess the feasibility of projects of landing in parallel runways, one of the important factors to be analyzed is the evaluation of the risk of collision between aircraft, associated to these procedures. In this scenario, this research proposes to extend the Ogata safety assessment model in procedures for landing on parallel runways, whereas the original model aims to measure the level of risk associated only with conventional landing operations in parallel runways. The extension of this model occurs in order to allow the simulation of different landing scenarios, which makes possible both the conduct of comparative techniques / procedures used in landing operations on parallel runways, such as the risk level assessment. This model uses the Monte Carlo simulation, the same as the original model, in which a large number of simulations of possible scenarios for landings on parallel runways are evaluated. With these results, it studies the impact of the change of distance between lanes on the safety of aircraft landing on parallel runways.

Keywords: Air Traffic Control, Monte Carlo Method, Risk Analysis and Systems Simulation.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE EQUAÇÕES.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
1 Introdução	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Motivação.....	3
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Organização do Trabalho	6
2 Panorama Atual do Tráfego Aéreo e de Técnicas CSPA.....	8
2.1 Tráfego Aéreo	8
2.1.1 História do Tráfego Aéreo.....	9
2.1.2 Paradigma CNS/ATM.....	10
2.2 Definição de CSPA	12
2.3 Componentes CSPA.....	13
2.3.1 ILS.....	13
2.3.2 PRM	15
2.3.3 ADS-B.....	16
2.3.4 SBAS (Satellite-Based Augmentation System) e/ou WAAS (Wide Area Augmentation System)	17
2.4 Procedimentos CSPA	19
2.4.1 Procedimentos Convencionais de Pouso.....	19
2.4.2 Procedimentos SOIA.....	20
2.4.3 Procedimentos RNP e RNAV	22
2.5 Considerações Finais deste Capítulo.....	23
3 Segurança em Tráfego Aéreo e em Procedimentos de Pouso	24
3.1 Segurança em Tráfego Aéreo	24
3.1.1 Conceitos de Risco e Segurança.....	24
3.1.2 Fatores de Incerteza no Voo.....	28
3.2 Segurança em Procedimentos de Pouso	29
3.2.1 Separação Mínima Entre Aeronaves	29
3.2.2 Procedimentos de Pouso em Pistas Paralelas	35
3.2.3 Efeito de Vórtices (Wake Vortex).....	38
3.3 Cálculo do Risco Total.....	40
3.4 Considerações Finais deste Capítulo.....	41
4 Modelos de Avaliação de Risco para Pousos.....	43
4.1 Introdução.....	43
4.2 Categorização de Modelos de Avaliação de Risco	43
4.2.1 Categorização de (KUCAR; YANG, 2000).....	44

4.2.2	Categorização de (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009)	47
4.3	Considerações Finais deste Capítulo.....	51
5	Proposta de Extensão de Modelo de Avaliação de Risco para Pousos em Pistas Paralelas (CSPA).....	52
5.1	Introdução.....	52
5.2	Modelo de Avaliação de Risco de (OGATA, 2003)	52
5.3	Proposta de Extensão de Modelo de Avaliação de Risco para CSPA	54
5.3.1	Diferenciais da Proposta de Extensão do Modelo de Avaliação de Risco.....	55
5.3.2	Categorização do Modelo Utilizado.....	56
5.4	Mapeamento das Variáveis Utilizadas na Extensão Proposta ao Modelo de Avaliação de Risco	58
5.5	Descrição do Algoritmo do Modelo Estendido.....	62
5.6	Hipóteses Adotadas e Restrições do Modelo Estendido	66
5.7	Resumo das Características do Modelo Estendido Utilizado e o Modelo de (OGATA, 2003).....	68
5.8	Considerações Finais deste Capítulo.....	70
6	Método de Análise e Cenários de Avaliação da Proposta de Modelo Estendido	71
6.1	Introdução.....	71
6.2	Método de Análise	71
6.3	Cálculo do Coeficiente de Risco	73
6.4	Cenários de Avaliação de Risco de Colisão.....	74
6.4.1	Pousos Convencionais entre o Modelo de (OGATA, 2003) e o Modelo Estendido	76
6.4.2	Pousos com SOIA e ILS/PRM.....	77
6.4.3	Pousos Convencionais e SBAS	80
6.4.4	Pousos Convencionais e ADS-B	81
6.5	Considerações Finais deste Capítulo.....	82
7	Análise dos Resultados.....	83
7.1	Introdução.....	83
7.2	Cenário 1: Modelo de (OGATA, 2003) e Modelo Estendido	84
7.3	Cenário 2: Pousos Convencionais com ILS/PRM e Pousos com SOIA e ILS/PRM... ..	89
7.4	Cenário 3: Pousos Convencionais com ILS/PRM e Pousos com RNP e ILS/PRM	93
7.5	Cenários 4 e 5: Pousos Convencionais com ILS/PRM e Pousos Convencionais com SBAS / ADS-B	94
7.6	Avaliação das Análises das Simulações.....	96
7.7	Considerações Finais deste Capítulo.....	97
8	Considerações Finais.....	98
8.1	Principais Contribuições	98
8.2	Principais Resultados Obtidos.....	99
8.3	Propostas de Trabalhos Futuros	100
8.4	Conclusões	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	ANEXOS	109
	ANEXO A.....	110
	ANEXO B.....	112
	ANEXO C.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimento de Passageiros nos Aeroportos Brasileiros (Adaptado de (INFRAERO, 2010))	5
Figura 2 - Necessidades e Pilares Tecnológicos do CNS/ATM (adaptada de CHUJO; WALTER, 2005)	11
Figura 3 - Área de Alcance do LOC.....	14
Figura 4 - Foto de um LOC (Fonte: Wikimedia Commons)	14
Figura 5 - Foto de um PRM (Fonte: (ATC MUSEUM, 1997)).....	16
Figura 6 - Comparativo entre o ADS-B e o <i>Long Range Radar</i> (adaptado de (POWELL, 2006)).....	17
Figura 7 - Estrutura do Sistema SBAS + GPS (adaptado de (FAA, 2001)).....	18
Figura 8 - Procedimento Convencional	20
Figura 9 - Procedimento SOIA	21
Figura 10 - Média Histórica de Número de Fatalidades (ICAO, 2008)	26
Figura 11 - Região ALARP e Questão Risco x Custo (adaptado de (COX; TAIT, 1998))	27
Figura 12 - Fatores de Incerteza em um Voo (adaptado de (REYNOLDS; HANSMAN, 2000)).....	29
Figura 13 - Gráfico de Probabilidade de Perda de Separação x Distância Mínima (adaptado de (KROZEL, et al., 1997))	32
Figura 14 - Distribuição Estatística de Trajetória (adaptado de (KROZEL, et al., 1997)).....	34
Figura 15 - Ilustração da Separação Mínima Lateral e Longitudinal (adaptado de (KING; KUCHAR, 2000)).....	35
Figura 16 – Aeronaves Utilizando Trajetórias Convencionais (adaptado de (NEWMAN, et al., 2007)).....	36
Figura 17 - Aeronaves Utilizando Trajetória RNP (adaptado de (NEWMAN, et al., 2007)) ..	37
Figura 18 - Aeronaves Utilizando Trajetória SOIA (adaptado de (NEWMAN, et al., 2007)).....	37
Figura 19 - Tipos de Propagação de Estado (adaptado de (KUCHAR; YANG, 2000))	44
Figura 20 - Exemplo de Árvore de Falhas (VESELY; ROBERTS, 1987)	49
Figura 21 - Exemplo de DCPN (adaptado de (SHORTLE, et al., 2004))	50
Figura 22 - Ilustração de Situação de Perda de Separação entre Aeronaves	53
Figura 23 - Diagrama com as Principais Variáveis Utilizadas no Modelo Estendido	62
Figura 24 - Fluxograma do Algoritmo Estendido Utilizado no Modelo Estendido	63
Figura 25 - Representação Gráfica das Equações 4 e 5.....	64
Figura 26 - Representação Gráfica das Equações 6 e 7.....	65
Figura 27 - Gráfico Comparativo entre Modelo de (OGATA, 2003) e o Modelo Estendido ..	87
Figura 28 - Gráfico com os Resultados da Simulação SOIA + ILS/PRM	91
Figura 29 - Comparativo entre Pousos SOIA e Convencionais para 700 pés	92
Figura 30 - Comparativo entre ILS/PRM, SBAS e ADS-B	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos Mínimos de Altura e Visibilidade para Categorias ILS (FAA, 2006)..	15
Tabela 2 - Tabela de Distâncias Mínimas por Categoria de Aeronave (em milhas náuticas – NM).....	31
Tabela 3 - Categorização da Proposta conforme (KUCCHAR; YANG, 2000).....	57
Tabela 4 - Mapeamento entre Fatores e Variáveis de Incerteza.....	59
Tabela 5 - Diferenças e Semelhanças entre os Modelos de (OGATA, 2003) e a Proposta de Modelo Estendido	69
Tabela 6 - Comparativo dos Valores Adotados para Obtenção do $P(E)$ – Modelo de (OGATA, 2003) x Modelo Estendido	74
Tabela 7 - Mapeamento dos Cenários de Avaliação de Risco de Colisão	75
Tabela 8 - Parametrização das Incertezas.....	76
Tabela 9 - Parametrização das Variáveis.....	77
Tabela 10 - Parametrização das Incertezas.....	79
Tabela 11 - Parametrização das Variáveis.....	79
Tabela 12 - Parametrização das Incertezas.....	80
Tabela 13 - Parametrização das Variáveis.....	81
Tabela 14 - Parametrização das Incertezas.....	82
Tabela 15 - Parametrização das Variáveis.....	82
Tabela 16 - Comparativo entre Modelo (OGATA, 2003) e Modelo Proposto.....	86
Tabela 17 - Número de Conflitos no Cenário SOIA+ILS/PRM para 100.000 Simulações	90
Tabela 18 - <i>Heading</i> Mínimo Aceitável Conforme Distância Entre Pistas.....	92
Tabela 19 - Número de Conflitos no ILS/PRM, SBAS e ADS-B em 100.000 Simulações	95

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo do Risco	25
Equação 2 - Cálculo de Risco Simplificado	26
Equação 3 - Cálculo do Risco Total	40
Equação 4 – Atualização da posição da aeronave líder na coordenada longitudinal	64
Equação 5 – Atualização da posição da aeronave líder na coordenada lateral.....	64
Equação 6 – Atualização da posição da aeronave seguidora na coordenada longitudinal	65
Equação 7 – Atualização da posição da aeronave seguidora na coordenada lateral	65
Equação 8 – Atualização da posição inicial da aeronave seguidora na coordenada lateral	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance Broadcast</i>
AILS	<i>Airborne Information for Lateral Spacing</i>
ALARP	<i>As Low As is Reasonably Praclicable</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
AVOSS	<i>Aircraft Vortex Spacing System</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATCT	<i>Airport Traffic Control Tower</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATN	<i>Aeronautical Telecommunication Network</i>
CNS/ATM	<i>Communications, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management</i>
CSPA	<i>Closely Spaced Parallel Approaches</i>
DCPN	<i>Dynamically Colored Petri Nets</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DH	<i>Decision Height</i>
EUROCONTROL	<i>European Organization for the Safety of Air Navigation</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GP	<i>Glidepath</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GS	<i>Glideslope</i>
GUS	<i>Ground Uplink Station</i>
ICAN	<i>International Commission for Air Navigation</i>
ICAO	<i>Internacional Civil Aviation Organization</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
INFRAERO	Empresa Brasileira de I nfraestrutura A eroportuária
LAAS	<i>Local Area Augmentation System</i>
LOC	<i>Localizer</i>
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i>
MTOW	<i>Maximum Takeoff Weight</i>
NTZ	<i>No Transgression Zone</i>

PIpE/SEC	Plataforma Integrada para Ensaios de Sistemas Embarcados Críticos
PRM	<i>Precision Runway Monitor</i>
RNAV	<i>Area Navigation</i>
RNP	<i>Required Navigation Performance</i>
RVR	<i>Runway Visual Range</i>
RVSM	<i>Reduced Vertical Separation Minimum</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SBAS	<i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SOIA	<i>Simultaneous Offset Instrument Approach</i>
SSR	<i>Secondary Surveillance Radar</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>
WMS	<i>Wide-Area Master Station</i>
WRS	<i>Wide-Area Reference Station</i>

1 Introdução

O intuito deste capítulo é apresentar os objetivos deste trabalho de pesquisa, a motivação e as justificativas que resultaram na escolha desse tema de dissertação, assim como a organização geral deste trabalho.

Os modelos de avaliação de segurança relacionados aos processos de controle do espaço aéreo permitem simular aspectos de risco envolvidos em procedimentos operacionais e/ou técnicas relacionadas, sendo aplicáveis para sistemas de controle do tráfego aéreo civil ou militar. Esses modelos, normalmente, utilizam-se de parâmetros de segurança estabelecidos a partir de padrões e recomendações normativas feitas por entidades nacionais e internacionais (FAA, 2010a).

Quanto às entidades normativas nacionais, destacam-se o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo), vinculado ao Comando da Aeronáutica (DECEA, 2010) e a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), vinculado ao Ministério de Defesa (ANAC, 2010).

Entre as principais entidades normativas internacionais, encontram-se a ICAO (*Internacional Civil Aviation Organization*), a EUROCONTROL (*European Organization for the Safety of Air Navigation*) e a FAA (*Federal Aviation Administration*).

A partir das recomendações de segurança feitas pelas entidades normativas, são especificados um conjunto de normas e parâmetros de segurança, com o intuito de reduzir a ocorrência de incidentes no âmbito do tráfego aéreo e, em especial no foco desta pesquisa, na etapa de aproximação de aeronaves em procedimentos de pouso simultâneos em pistas paralelas, cujo contexto é brevemente apresentado a seguir.

Durante um procedimento de pouso, diversos fatores podem impactar o risco de duas aeronaves violarem fatores de segurança (com respeito à manutenção de distância segura entre elas). Os principais fatores são: a propagação de turbulências ou vórtices gerados por uma das aeronaves, as incertezas associadas à posição atual da aeronave, o deslocamento/velocidade das aeronaves, o tipo de técnica utilizada para auxiliar no procedimento de pouso, os cenários de pouso, o tipo de pareamento entre as aeronaves e a distância entre pistas paralelas, quando for o caso (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2008).

Esses mesmos fatores, considerando os procedimentos de pousos em pistas paralelas, também se aplicam aos procedimentos de decolagem de pistas paralelas; porém, neste caso existe uma maior possibilidade de se abortar o processo de decolagem devido ao fato de as aeronaves

estarem próximas ao solo em grande parte do tempo durante este procedimento e poderem tanto parar em solo como prosseguir com a decolagem, utilizando-se para isso de manobras evasivas. Visto que o procedimento de pouso em pistas paralelas é mais arriscado que o procedimento de decolagem de pistas paralelas, optou-se neste trabalho pela análise apenas dos pousos.

O cálculo do risco associado aos procedimentos de pouso em pistas paralelas se torna fundamental na medida em que os impactos dos fatores de risco mudam ao longo do tempo, devido ao aumento da complexidade tecnológica (KOREN; KRISHNA, 2007) e a adoção de novos procedimentos. Esses impactos, caso sejam subestimados, podem resultar no risco de colisão entre aeronaves. Portanto, o desenvolvimento de modelos de segurança que abordam quantitativamente o risco envolvido durante os procedimentos de pousos em pistas paralelas se torna ainda mais importante.

Neste trabalho de pesquisa, um subconjunto de fatores críticos é utilizado como cenário básico para avaliação de risco, envolvendo aproximações de aeronaves em procedimentos de pouso em pistas paralelas muito próximas (com pequena separação), chamadas de aproximações do tipo CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*). Este tipo de aproximação representa um desafio especial em termos de análise das variáveis que contribuem para o risco de separação entre aeronaves.

Nos próximos subitens, é apresentado o objetivo principal deste trabalho de pesquisa, assim como a motivação e os fatores que servem como justificativa para o desenvolvimento deste trabalho. Por fim, é descrita a organização deste trabalho, com uma descrição sucinta do conteúdo de cada capítulo.

1.1 Objetivo

O objetivo desta dissertação de mestrado é avaliar o risco de colisão em procedimentos de aproximações de aeronaves no pouso em pistas paralelas muito próximas, por meio de uma modelagem de análise de risco, considerando os diversos conjuntos de procedimento e técnica de pouso para a etapa de aproximação final entre as aeronaves.

Para isso, é proposta uma extensão do modelo de segurança de (OGATA, 2003), a ser testada por meio de simulações computacionais, utilizando-se para isso do método de Monte Carlo para análise de cenários de pouso, envolvendo técnicas de pousos distintas da utilizada por aquele autor e analisando-se os riscos associados durante a operação de aproximação de aeronaves em procedimentos de pouso em pistas paralelas.

A avaliação do risco em diversos cenários de pouso em pistas paralelas permite estabelecer comparativos com um cenário base de pouso convencional (em que as duas aeronaves seguem uma trajetória paralela durante todo o procedimento de pouso) com o uso do ILS/PRM (sistema de pouso com instrumentos com um radar de alta precisão) e a quantificação do risco em cada caso, sendo esta a principal contribuição deste trabalho de pesquisa.

1.2 Motivação

A primeira grande motivação envolvida neste trabalho de pesquisa é a necessidade de se analisar os riscos associados em diversos setores do tráfego aéreo, o que torna possível não apenas a quantificação dos riscos para análise da segurança e aderência às normas internacionais, mas também possibilita desenvolver estudos sobre capacidade ou dimensionamento da infraestrutura aeroportuária em vista dos riscos envolvidos.

A segunda motivação, não menos importante, é a ausência de análises abrangentes sobre os aspectos envolvidos nas técnicas em aproximações do tipo CSPA, assim como seus cenários de voo, de forma que este trabalho espera contribuir com informações, referências e análises nesta área. O modelo de segurança proposto por (OGATA, 2003) constitui uma análise para o cenário específico de pousos em pistas paralelas de forma convencional (são pousos na qual as aeronaves seguem trajetórias paralelas próximas durante todo o procedimento de pouso), de forma que a extensão proposta neste trabalho permite incluir um comparativo entre as diversas técnicas do CSPA.

1.3 Justificativa

A utilização de técnicas CSPA nos aeroportos tem, como principais motivadores, os aspectos econômicos e financeiros para expansão da capacidade aeroportuária e os estudos de tendências futuras do tráfego aéreo. Dentre estes estudos, destacam-se os estudos do Eurocontrol, encontrado em (EUROCONTROL, 2006) e resumido em (POWELL, 2006), com as seguintes previsões:

- O número de voos, no mundo, em relação a 2003, pode dobrar até 2025;
- Os 20 maiores aeroportos do mundo ficarão saturados por 8 a 10 horas por dia em 2025;
- Os 60 maiores aeroportos do mundo estarão congestionados em 2025; e

- Estima-se um intervalo de 15 a 20 anos necessário para se desenvolver uma nova infraestrutura aeroportuária adequada.

Em um estudo mais recente do Eurocontrol, encontrado em (EUROCONTROL, 2010), estima-se que haverá um aumento de 22% no número de voos na Europa até 2016 (11,5 milhões de voos), em relação a 2009. Esse crescimento ocorre mesmo após a forte queda na demanda ocorrida devido aos efeitos da crise econômica de 2007. É também projetado que, em 2012, o número de voos seja superior aos níveis pré-crise no cenário europeu.

Com a divulgação desse e de outros estudos apontando tendências semelhantes de aumento de demanda no tráfego aéreo, alternativas para acomodar essa expansão foram apresentadas, entre as quais as citadas por (POWELL, 2006):

- Expansão do número de aeroportos no mundo: É uma opção considerada muito onerosa economicamente, pois caso seja exclusivamente implantada, possui como efeitos colaterais o aumento na complexidade logística na alocação e distribuição de aeronaves na malha aérea, além de custos relacionados à aquisição de terrenos e instalação de toda uma infraestrutura aeroportuária;
- Utilização de aeroportos secundários: É uma opção cuja viabilidade é fortemente dependente das adaptações na infraestrutura dos aeroportos secundários, assim como da realocação de rotas aéreas e da disposição física desses aeroportos. Portanto, esta opção não se apresenta como uma solução genérica e aplicável a diferentes malhas de tráfego aéreo; e
- Utilização de novas alternativas para aumento de capacidade aeroportuária: Inúmeras alternativas foram sugeridas e, dentre elas, as técnicas CSPA. As vantagens do uso de novas técnicas, normalmente, envolvem investimentos menores e tempos de implantação reduzidos. E as desvantagens estão situadas na ausência de familiaridade com as novas abordagens utilizadas e tempos de retorno de investimento incertos (por ausência de bases históricas de custos e retornos econômicos).

A respeito das estimativas de demanda futura, devido à recente crise econômica (ocorrida no final do ano de 2007), houve uma perceptível redução na demanda pelo transporte aéreo na Europa (EUROCONTROL, 2008), mas isso não afetou as perspectivas de longo prazo do aumento de demanda, adiando apenas em alguns meses (ou no máximo 1 ou 2 anos) os

eventuais gargalos que serão encontrados futuramente na capacidade aeroportuária, caso nenhuma atitude seja tomada.

Em relatório do (IPEA, 2010), é mencionado que em grandes *hubs*¹, tais como o de Nova Iorque (com 3 aeroportos principais e 3 alternativos) e Londres (com 4 aeroportos principais e 2 alternativos), já existe uma saturação em termos de capacidade física e geográfica para expansão. Nesses casos, está sendo cogitado o uso de tecnologias mais avançadas de controle do tráfego aéreo, como o uso de satélites geoestacionários.

Em relação ao cenário brasileiro de demanda no tráfego aéreo, a partir das medições de movimento de passageiros realizadas pela INFRAERO (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária) e apresentadas na Figura 1, observa-se que a quantidade de passageiros transportada nos aeroportos brasileiros cresce desde 2003, acumulando um aumento de aproximadamente 80% no período entre 2003 e 2009 (INFRAERO, 2010). Com relação à demanda específica para os 20 principais aeroportos brasileiros, o estudo da (MCKINSEY, 2010) apresenta uma projeção de crescimento anual de 5% ao ano na demanda de passageiros entre 2009 e 2030, quase que triplicando a demanda em uma janela de aproximadamente duas décadas, sendo este prognóstico similar (em termos de saturação dos principais aeroportos) ao cenário mundial apresentado anteriormente no estudo do Eurocontrol anteriormente.

Figura 1 - Movimento de Passageiros nos Aeroportos Brasileiros
(Adaptado de (INFRAERO, 2010))

¹ *Hub*: são aeroportos que concentram grande volume de passageiros e que possuem como objetivo principal servir de ponto de transferência de passageiros para seus destinos finais.

A partir dos cenários de demanda crescente, tanto para o caso mundial, como para o caso brasileiro, o uso de técnicas CSPA permite que os aeroportos atuais consigam expandir a capacidade da malha aeroportuária. A adoção do CSPA ocorre, em especial, em aeroportos de regiões mais desenvolvidas, como a América do Norte, Europa e o Sudeste Asiático, pois essas regiões possuem zonas urbanas fisicamente saturadas e que não permitem facilmente a construção de novos aeroportos. No mundo, aproximadamente 33 pistas paralelas estavam sendo construídas em 2006 (POWELL, 2006). Já no Brasil, considera-se o uso do CSPA na hipotética terceira pista do Aeroporto de Guarulhos (MOSER, 2007).

Com a implantação do CSPA, devido à natureza distinta das técnicas adotadas, surge a necessidade de modelos que avaliem o risco de perda de separação entre aeronaves em procedimentos de pouso simultâneos em pistas paralelas, que é o objetivo deste trabalho de pesquisa.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado com a seguinte estrutura.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral, contendo o objetivo, a motivação e justificativas para a realização desta pesquisa na área de análise de riscos em aproximações de aeronaves em procedimentos de pouso em pistas paralelas.

O Capítulo 2 contém uma visão geral a respeito do tráfego aéreo e sobre as técnicas CSPA, abordando conceitos e o panorama geral necessários para a compreensão sistêmica deste trabalho de pesquisa.

O Capítulo 3 mostra os aspectos de segurança envolvidos em tráfego aéreo (como os conceitos de risco, confiabilidade e segurança) e também os aspectos relacionados aos procedimentos de pouso (separação entre aeronaves, cenários de pouso e vórtices).

O Capítulo 4 apresenta duas taxonomias desenvolvidas para categorização dos modelos de segurança e uma discussão sobre o estado da arte em análise de procedimentos CSPA.

O Capítulo 5 descreve a proposta de extensão de um modelo de risco, proposto por (OGATA, 2003), partindo dessa pesquisa e evoluindo para uma aplicação mais abrangente, descrevendo os seus diferenciais, além das variáveis envolvidas, algoritmos e novas hipóteses/restrições adotadas.

O Capítulo 6, por sua vez, descreve o método de análise aplicado para avaliação dos cenários de simulação e detalha os parâmetros utilizados para os comparativos com um cenário base, utilizando as técnicas CSPA.

O Capítulo 7 apresenta os resultados obtidos e a sua conseguinte análise, com considerações a respeito dos parâmetros envolvidos e a relação com os resultados esperados *a priori*.

O Capítulo 8 traz as conclusões gerais deste trabalho, indicando linhas de possíveis trabalhos futuros que surgem a partir desta pesquisa, bem como as considerações finais do trabalho.

2 Panorama Atual do Tráfego Aéreo e de Técnicas CSPA

Este capítulo apresenta um panorama a respeito do tráfego aéreo e das técnicas CSPA, descrevendo algumas de suas características que servem como pilares para a compreensão e o desenvolvimento dos modelos de análise de risco, que são apresentados e descritos nos capítulos seguintes.

A constante evolução dos procedimentos e técnicas adotadas no sistema de Tráfego Aéreo, especialmente em virtude do paradigma CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management*), considerando o aumento da demanda prevista para a malha aérea (vide Figura 1), tornou o sistema de controle do Tráfego Aéreo ainda mais complexo, dificultando uma análise rápida dos aspectos de segurança envolvidos.

Como forma de facilitar o estudo dos sistemas atuais de Tráfego Aéreo, inicialmente é apresentado, neste capítulo, o conceito de serviço de controle de Tráfego Aéreo e, logo a seguir, um histórico sucinto da evolução ocorrida desde os primórdios do controle de operação da malha aérea, além da apresentação do paradigma CNS/ATM. O CNS/ATM introduz um conjunto de técnicas e conceitos, tais como satélites, como o GPS (*Global Positioning System* – norte-americano), o GLONASS (*Global Navigation Satellite System* – russo) e o Galileo (europeu), para melhorar a acurácia² na navegação aérea, atendendo aos critérios de segurança dos conceitos RVSM (*Reduced Vertical Separation Minimum*) e RNP (*Required Navigation Performance*). O CNS/ATM permite resolver problemas de navegação, como atrasos de voos, congestionamentos aéreos e a ampliação da área de cobertura (CHUJO; WALTER, 2005).

Na segunda parte deste capítulo, o conceito CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*) é definido e, nas suas duas últimas partes, são apresentados os componentes e procedimentos que integram o conjunto de técnicas CSPA, normalmente aplicadas em aeroportos no mundo.

2.1 Tráfego Aéreo

O Controle de Tráfego Aéreo é um serviço prestado pelos controladores de tráfego aéreo com o intuito de prover a separação segura entre aeronaves. Os principais objetivos desse controle são prevenir colisões entre aeronaves, organizar o fluxo de tráfego aéreo e fornecer informações para os pilotos, além de prover o serviço de alerta (FAA, 2006).

² Acurácia: Está relacionada ao grau de exatidão obtido em determinado requisito (CHUJO; WALTER, 2005)

A área de atuação de controle é chamada de **espaço aéreo controlado**, enquanto que o **espaço aéreo não-controlado** refere-se às áreas sem cobertura e controle pelos serviços de tráfego aéreo, geralmente por estarem fora do alcance de comunicação. Historicamente, os sistemas de controle passaram a existir quando o volume de tráfego aéreo, crescente, precisava ser regulado, de forma a garantir um nível adequado de segurança para os seus usuários, o que será brevemente detalhado na subseção a seguir.

2.1.1 História do Tráfego Aéreo

Esta subseção possui como base dois documentos sobre a história da criação e evolução da FAA, conforme descrito em (FAA, 2007b) e (FAA, 2010b), destacando-se alguns fatos históricos de importância para a compreensão da necessidade e do progresso contidos nos sistemas de controle de tráfego aéreo, focados no cenário norte-americano.

Nos primórdios da navegação aérea, devido ao baixo volume de aeronaves circulando no espaço aéreo, as aeronaves voavam quase que livremente, utilizando pontos de referência geográficos como mecanismo de referência para navegação. Em 1919, foi criada a ICAN (*International Commission for Air Navigation*), com o intuito de conceber um conjunto de regras gerais para o Tráfego Aéreo. Essas regras, e eventuais procedimentos associados, foram utilizados por grande parte dos países por onde as aeronaves transitavam, sendo que uma das exceções notáveis foram os Estados Unidos, que criou suas próprias normas de gestão do Tráfego Aéreo, com a aprovação do *Air Commerce Act*, de 1926 (FAA, 2007b).

Os primeiros conjuntos de regras eram relativamente simples e controlavam o fluxo de aeronaves somente nas regiões próximas às pistas de pouso e decolagem. Os pilotos precisavam se atentar a respeito da sinalização de permissão para decolagem, o que ocorria apenas quando alguma aeronave prevista para pousar já tivesse pousado ou não houvesse nenhuma aeronave prevista para pouso ou decolagem. Como o volume de tráfego aéreo, naquela época, permitia um espaçamento temporal³ entre voos, as normas limitavam-se a disciplinar e organizar os procedimentos de voo.

Entre os períodos da Primeira e Segunda Grande Guerras Mundiais, o aumento do volume de tráfego ultrapassou a capacidade de controle do tráfego aéreo (que ocorriam localmente, no aeroporto), passando a demandar soluções que permitissem uma visão regional do tráfego aéreo, com vistas a um melhor gerenciamento e otimização das linhas aéreas. Para isto, com o

³ Espaçamento temporal consiste no intervalo de tempo utilizado entre voos consecutivos, com o objetivo de permitir a formação de uma região que atue como margem de segurança para eventuais desvios de trajetória de uma aeronave (OLIVEIRA, 2007).

advento dos centros de controle de tráfego aéreo (ATCs – *Air Traffic Control*), surgiu a comunicação por sinais visuais, entre as aeronaves e centros de comando, que orientavam a permissão ou não de procedimentos de pouso e decolagem em nível regional, aperfeiçoando a coordenação no controle do espaço aéreo (FAA, 2007b).

Na década de 30, alguns modelos de aeronaves continham sistemas de comunicação por rádio e houve a construção das torres de controle em aeroportos de médio e grande porte (ATCT – *Airport Traffic Control Tower*). A comunicação por rádio entre as torres de controle e as aeronaves permitia a identificação e coordenação de um número elevado de aeronaves na região. Desta forma, ampliou-se de maneira significativa a capacidade do emergente sistema de controle de tráfego aéreo. Assim, cerca de 20 torres de controle já utilizavam o rádio como sistema de comunicação principal nos Estados Unidos em 1935 (FAA, 2007b).

Após a Segunda Grande Guerra Mundial, houve uma revolução nos sistemas de controle de tráfego aéreo, com o uso do radar (a partir de 1952), de *transponders*⁴ com a identificação da aeronave (a partir de 1960) e de instrumentos de navegação. Esses avanços permitiram uma redução de aproximadamente 50% na distância entre aeronaves, quando comparada com as décadas anteriores (FAA, 2007b).

No intervalo entre as décadas de 1960 e 1990, diversas inovações foram incorporadas nos sistemas de controle de tráfego aéreo, dentre as quais a modernização das estações dos controladores de voo, definição e padronização de corredores aéreos, assim como radares de alta-precisão e o uso de computadores para supervisão da malha aérea (FAA, 2010b).

Com o advento da comunicação digital e da navegação por satélite (a partir da década de 1990), novos horizontes foram abertos para os sistemas de controle de tráfego aéreo. Como forma de atender a essas novas demandas, a ICAO definiu, em 1991, o conceito CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management*), representando o novo paradigma em tráfego aéreo (CHUJO; WALTER, 2005), descrito brevemente na próxima seção.

2.1.2 Paradigma CNS/ATM

O conceito CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management*) foi definido com o intuito de se desenvolver um sistema global e harmonizado de serviços de tráfego aéreo, melhorando os aspectos de segurança, eficiência e regularidade no transporte

⁴ *Transponders* são equipamentos que atuam na recepção, transmissão e, conforme o caso, amplificação dos sinais em diferentes frequências.

aéreo, além de reduzir eventuais incompatibilidades entre sistemas de tráfego aéreo que são observadas em diversos países (VISMARI, 2007).

Em termos de necessidades, o CNS/ATM apresenta-se como uma solução para atender aos requisitos de capacidade, eficiência e segurança nos sistemas de controle de tráfego aéreo, conforme ilustrado na Figura 2. Nessa figura, a parte ATM introduz novos conceitos operacionais, enquanto que a parte CNS apresenta novos equipamentos. Os dois, conjuntamente, tornam-se os pilares para atender às necessidades presentes e futuras dos sistemas de tráfego aéreo.

Figura 2 - Necessidades e Pilares Tecnológicos do CNS/ATM
(adaptada de CHUJO; WALTER, 2005)

Esse conceito é baseado em quatro elementos principais, cujas mudanças propostas são mencionadas a seguir, conforme (ICAO, 2000) e (VISMARI, 2007).

2.1.2.1 Comunicação (C)

Os sistemas atuais de comunicação por voz, por via analógica, passariam a ser utilizados somente em situações de emergência, como canal de *backup*. As comunicações devem ser realizadas por meios digitais, utilizando-se satélites, tanto para dados como para voz. No caso dos dados, um aspecto positivo é a possibilidade de se aumentar a automação em diversas atividades de controle do tráfego aéreo, pois o conceito CNS/ATM prevê a existência de uma ATN (*Aeronautical Telecommunication Network*), rede esta responsável pela transmissão de dados entre os usuários do sistema de tráfego aéreo (VISMARI, 2007).

2.1.2.2 Navegação (N)

Os sistemas de navegação passariam a utilizar o conceito GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), com os serviços de navegação possuindo níveis elevados de integridade e acurácia, independentes das condições meteorológicas. Como parte deste conceito, esse tipo de navegação será realizado em qualquer parte do planeta, bastando apenas que as aeronaves possuam equipamentos de bordo capazes de receber sinais por meio dos satélites, o que elimina basicamente a atual infraestrutura e sistemas de auxílio à navegação convencional em solo (VISMARI, 2007).

2.1.2.3 Vigilância (S)

Inicialmente, os atuais radares permaneceriam em uso, enquanto ocorre a introdução gradual do paradigma ADS (*Automatic Dependent Surveillance*), cujo modo de funcionamento é brevemente descrito na seção 2.3.3. O ADS permite que aeronaves e satélites troquem informações, tais como seu estado, posição e velocidade por intermédio dos atuais enlaces de comunicação digital, o que permite construir mecanismos de detecção e resolução automática de conflitos de voo (VISMARI, 2007).

2.1.2.4 Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM)

Os três elementos do CNS, apresentados anteriormente, servem como suporte para as operações de gerenciamento de tráfego aéreo, no sentido de melhorar os serviços de controle e fluxo no tráfego aéreo. O ATM moderno permite uma maior flexibilidade em termos de navegabilidade das aeronaves, possibilitando melhorias em termos de custo e eficiência (VISMARI, 2007).

2.2 Definição de CSPA

Antes de detalhar os componentes das técnicas CSPA, é necessário definir precisamente o conceito CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*). O CSPA refere-se às aproximações simultâneas de pares de aeronaves em aeroportos com pistas paralelas e que são muito próximas entre si (TEO, et al., 2005). A definição de “pistas muito próximas entre si” varia conforme o autor utilizado. Entretanto, em levantamento realizado em (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2008), observa-se que a distância entre pistas comumente utilizada para o CSPA situa-se no intervalo entre 750 e 4.300 pés⁵.

⁵ 1 pé é igual a 0,305 metro.

O CSPA também engloba o conjunto de técnicas e/ou procedimentos de pouso utilizados que permitem aproximações entre aeronaves com distâncias pequenas entre si, o que pode incluir técnicas como, por exemplo, a navegação de precisão utilizando o GPS, ou mesmo os procedimentos de pouso com trajetórias convergentes.

Em virtude da quantidade elevada de técnicas e/ou procedimentos viáveis para uso no CSPA, foram levantadas, neste trabalho, algumas das principais soluções adotadas no mundo, apresentadas na subseção a seguir. Um conjunto dessas soluções será objeto das simulações para medição de risco de operações de pousos simultâneos de aeronaves, sendo os resultados apresentados na parte prática deste trabalho.

2.3 Componentes CSPA

Nesta seção, são apresentados os principais componentes envolvidos nas alternativas de implantação de técnicas CSPA, ressaltando-se que são abordagens com grandes diferenças entre si, necessitando de uma harmonização das características no momento em que são mapeadas as variáveis críticas para análise de risco.

2.3.1 ILS

O ILS (*Instrument Landing System*) é o sistema de pouso por instrumentos, utilizado especialmente em condições adversas de visibilidade. Também utilizado no acompanhamento dos procedimentos de pouso, este sistema fica em solo e próximo às pistas de pouso. O acompanhamento das aeronaves é feito por meio de uma combinação de sinais de rádio e feixes de luz de alta intensidade para auxiliar o piloto a conduzir a aeronave em direção à pista de pouso (NAVCEN, 2001). Esses sistemas são encontrados em aeroportos de médio e grande porte, em sua quase totalidade.

A precisão dos sistemas ILS deve ser analisada a partir de dois componentes, o LOC (*Localizer*) e o GP (*Glidepath*) ou GS (*Glideslope*), cujas descrições são feitas a seguir (WOOD, 2010).

O LOC é um conjunto de antenas instaladas no final da pista de pouso, em que cada antena emite ondas de rádio concentradas, em frequências distintas, para que a aeronave consiga, a partir da variação na modulação do sinal, saber sua posição relativa à pista (com exceção da altitude, cuja informação é originária do GP). Para que a aeronave conheça sua defasagem angular em relação à pista, cada par de antenas possui uma variação angular distinta (uma à esquerda e outra à direita, em relação ao centro da pista), em que a predominância de sinais de

um determinado conjunto de antenas indica a falta de alinhamento correto da aeronave. Na Figura 3, a área de alcance de um par de antenas do LOC é ilustrada e, na Figura 4, há uma foto de um LOC (destacado dentro do círculo tracejado) de uma pista de pouso da Base Aérea de Whiteman, no Missouri-EUA.

Figura 3 - Área de Alcance do LOC

Figura 4 - Foto de um LOC (Fonte: Wikimedia Commons)

O GP possui função análoga ao LOC, emitindo ondas de rádio concentradas, porém para permitir que a aeronave saiba sua altitude relativa à pista. A defasagem angular das antenas é feita da seguinte forma: um dos conjuntos de antenas fica alinhado à pista, enquanto que o outro conjunto de antenas é inclinado em relação à pista.

A precisão dos sistemas ILS é feita por categorias, com requisitos mais rígidos, conforme aumenta a categoria do ILS. A Tabela 1 exhibe os parâmetros mínimos de DH⁶ (*Decision Height* ou Altura Mínima) e RVR⁷ (*Runway Visual Range* ou Alcance Visual da Pista), em metros e em pés, para cada categoria de ILS.

⁶ DH (*Decision Height*): é a altura mínima na qual um piloto deve ser capaz de visualizar os sinalizadores de aproximação da pista de pouso. Caso o piloto não os visualize, o procedimento de pouso deve ser abortado (FAA, 2006).

⁷ RVR (*Runway Visual Range*): é o alcance visual mínimo da pista requerido para que uma aeronave possa realizar o procedimento de pouso (FAA, 2006).

Tabela 1 - Requisitos Mínimos de Altura e Visibilidade para Categorias ILS (FAA, 2006)

Categoria ILS	DH Mínimo	RVR Mínimo
CAT I	Maior que 60 metros (~195 pés)	Maior que 550 metros (~1.805 pés)
CAT II	Maior que 30 metros (~100 pés)	Maior que 350 metros (~1.150 pés)
CAT IIIA	Maior que 30 metros (~100 pés)	Maior que 200 metros (~655 pés)
CAT IIIB	Maior que 15 metros (~50 pés)	Maior que 50 metros (~165 pés)
CAT IIIC	Sem valor mínimo	Sem valor mínimo

Fonte: (FAA, 2006)

Conforme a categoria do ILS utilizada, pode não haver a precisão necessária para permitir a implementação do CSPA. Para tanto, uma das alternativas é compor o uso do ILS com um PRM⁸ (*Precision Runway Monitor*), que é descrito a seguir, resultando na solução SOIA (*Simultaneous Offset Instrument Approach* – descrita mais adiante na subseção 2.4.2).

2.3.2 PRM

O PRM (*Precision Runway Monitor*) é uma categoria de radares de alta precisão e que são utilizados para auxiliar os pilotos e os controladores de voo, permitindo o acesso a informações precisas de localização de aviões próximos ao aeroporto e a realização de procedimentos de pouso em condições adversas de visibilidade.

A sua taxa de varredura é de 2 Hz (REDDY; MILLER, 2005), considerada como veloz e que possui alta precisão, devido à velocidade e quantidade das amostras obtidas em pequenos intervalos de tempo. Essa alta taxa de varredura decorre do fato de que o PRM não “gira” para realizar a varredura, como ocorre com as antenas de radares convencionais, pois o PRM possui uma forma fixa e arredondada que cobre 360° do espaço nos arredores. Apesar dessa taxa de varredura, a área de cobertura desse radar é pequena (em comparação ao ILS), normalmente cobrindo uma área de até 3 milhas náuticas (aproximadamente 5.600 metros) do aeroporto em questão (FAA, 2009).

Na Figura 5, é apresentada a foto de um PRM, para fins ilustrativos (ATC MUSEUM, 2010). Pode-se notar, nessa figura, a forma arredondada e fixa desse radar.

⁸ PRM (*Precision Runway Monitor*): é uma categoria de radar que possui como principais características a alta taxa de varredura e precisão, quando comparado aos radares convencionais.

Figura 5 - Foto de um PRM (Fonte: (ATC MUSEUM, 1997))

2.3.3 ADS-B

O ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*) é utilizado para distribuição de mensagens entre aeronaves, sistemas de satélites e estações em terra, contendo dados das aeronaves, como: Latitude, Longitude e Altitude; Velocidade; Intenção⁹; e Categoria da Aeronave¹⁰ (POWELL, 2006).

Uma aeronave equipada com ADS-B possui a capacidade de receber informações frequentes sobre o seu próprio posicionamento (por meio do GPS) e também da posição ou estado das aeronaves vizinhas (desde que também equipadas com equipamentos do tipo ADS-B). Isso permite melhorias significativas no uso do espaço aéreo, como a redução nos limites de separação entre aeronaves e o melhor monitoramento das condições de voo e das condições de segurança durante a navegação. As mensagens se propagam por um raio de até 200 milhas náuticas¹¹ (aproximadamente 370 quilômetros) (FAA, 2007b), permitindo uma boa visão situacional do tráfego aéreo durante um procedimento de pouso, por exemplo.

Devido à alta taxa de envio de mensagens de estado da aeronave (aproximadamente uma mensagem por segundo), os controladores de voo e aeronaves vizinhas conseguem determinar, de forma mais precisa, a trajetória da aeronave emissora das mensagens. A Figura 6 apresenta um gráfico comparativo das amostragens obtidas do ADS-B em relação aos radares convencionais. Devido à taxa superior de atualização do ADS-B em relação à taxa de atualização de um radar convencional (*long range radar*), ocorre uma interpolação e

⁹ Intenção: É o conhecimento das informações sobre a trajetória futura calculada pela aeronave (BARHYDT; WARREN, 2002).

¹⁰ Categoria da Aeronave: As categorias de aeronaves são definidas com base no peso da aeronave, sendo classificadas como pequenas, grandes ou pesadas (HINTON *et al*, 2000).

¹¹ 1 milha náutica é igual a 1.852 metros.

resolução melhores da trajetória utilizada pela aeronave, permitindo visualizar precisamente o caminho utilizado pela aeronave, quase que em tempo-real.

Figura 6 - Comparativo entre o ADS-B e o *Long Range Radar* (adaptado de (POWELL, 2006))

O uso do ADS-B ainda é polêmico em regiões com grandes concentrações de tráfego aéreo, devido à sua dependência com relação ao sistema GPS para detectar o posicionamento da aeronave no espaço aéreo. Para contornar esta situação, os radares convencionais continuam operando como sistema *backup* para o caso de a rede ADS-B ou GPS se tornar indisponível, possibilitando a continuidade dos serviços de tráfego aéreo (FAA, 2007b).

Outras aplicações do ADS-B ocorrem em regiões onde não é possível ou é custosa a instalação de radares, tais como nas redondezas de plataformas de petróleo e regiões montanhosas. Nesses tipos de regiões, ocorre ainda um tráfego relativamente alto de aeronaves (não apenas de aviões, mas também de helicópteros e outras categorias de aeronaves). Sendo assim, uma melhor precisão no posicionamento das aeronaves possibilita grandes melhorias nos serviços locais de navegação (POWELL, 2006) (FAA, 2007b).

2.3.4 SBAS (Satellite-Based Augmentation System) e/ou WAAS (Wide Area Augmentation System)

O SBAS (*Satellite-Based Augmentation System*), nomenclatura internacional, sendo o WAAS (*Wide Area Augmentation System*), o seu correspondente norte-americano, é um sistema

análogo ao GPS no sentido em que um conjunto de satélites é posicionado ao longo da órbita terrestre com o intuito de monitorar o tráfego aéreo em escala nacional ou global, assim como prover um posicionamento preciso para as aeronaves (FAA, 2001).

Devido ao seu alcance em escala continental, ao contrário de técnicas como o ADS-B, que possuem visualização regional, o SBAS torna possível, para os controladores de voo, um planejamento e ordenamento de aeronaves com maior antecedência. Além disso, permite janelas de tempos maiores para avaliação de possíveis situações que levem a congestionamentos no espaço aéreo.

No contexto do CSPA, o SBAS pode ser considerado um sistema de suporte para planejamento dos pousos em pistas paralelas, o que indiretamente contribui na redução segura da distância entre pistas para o procedimento de pouso em pistas paralelas. Esse sistema possui a precisão equivalente a de um ILS para o procedimento de pouso, além de possuir vantagens como a reutilização da frequência do GPS, permitindo o uso da mesma antena utilizada para obtenção de sinal do GPS.

Na Figura 7, é apresentada a estruturação do sistema SBAS + GPS que, neste caso, é composto por dois satélites geoestacionários (Satélite GEO) e outro conjunto de satélites GPS, enviando sinais conjuntamente para estações em terra WRS (*Wide-Area Reference Station*) que atuam como verificadores de erro de precisão e redundância de sinal. O WMS (*Wide-Area Master Station*) e o GUS (*Ground Uplink Station*) atuam, respectivamente, como estação concentradora de dados e antenas de transmissão/recepção de dados.

Figura 7 - Estrutura do Sistema SBAS + GPS (adaptado de (FAA, 2001))

Uma das diferenças principais do SBAS com relação ao sistema GPS é que os satélites SBAS são geoestacionários e em número bem reduzido, quando comparados à constelação de satélites GPS. Para realizar a localização de um avião de forma precisa, em 95% dos casos são necessários os sinais de GPS convencionais (de ao menos 3 ou 4 satélites), além dos sinais de 2 satélites do SBAS, responsáveis por transmitir informações com maior grau de precisão (FAA, 2001).

Há uma variante do SBAS (WAAS), chamada de GBAS (ou LAAS – *Local Area Augmentation System*), cujo escopo de atuação é regional, ou mesmo municipal, na qual se utiliza principalmente estações em terra (ao invés de satélites), cujas coordenadas sejam conhecidas.

Na abordagem por técnicas derivadas do GPS (SBAS/WAAS), vislumbra-se o uso de informações dos sistemas de GPS para o conceito de “*free flight*” (em que operador possui liberdade para definir a sua trajetória e a velocidade durante o voo), resultando na necessidade de modelos para detecção de conflito que sejam eficientes (MENON, et al., 1997), em que se deve considerar as possíveis estratégias de voo (nem sempre disponíveis *a priori*) e a capacidade de resolução de conflitos envolvendo múltiplas aeronaves.

2.4 Procedimentos CSPA

Nesta seção, são apresentados os principais procedimentos de pouso envolvidos nas alternativas de implantação de técnicas CSPA, que envolve três opções distintas de procedimentos: **Procedimentos Convencionais de Pouso**, **Procedimentos SOIA** e **Procedimentos RNP/RNAV**. Conforme mencionado na seção anterior, é necessária uma padronização dos parâmetros utilizados no momento em que são mapeadas as variáveis críticas para a análise de risco, de forma a permitir que sejam realizadas comparações entre os procedimentos e técnicas CSPA.

2.4.1 Procedimentos Convencionais de Pouso

Os procedimentos convencionais de pouso em pistas paralelas, utilizados em grande parte dos aeroportos no mundo, envolvem o pareamento simples entre aeronaves, conforme ilustrado na Figura 8.

Neste cenário, desde o início do procedimento de pouso, as aeronaves mantêm uma distância lateral fixa e constante entre si, que permanece até a finalização do procedimento. A utilização mais ampla deste procedimento é devido ao reuso dos instrumentos e técnicas

atuais dos aeroportos/aeronaves para a implantação do procedimento, o que torna o custo de implantação muito baixo.

Para atenuar os riscos de colisão entre aeronaves, costuma-se acrescentar uma distância longitudinal (note que, na Figura 8, as aeronaves não estão exatamente uma do lado da outra, para ilustrar esta distância), de forma a evitar que um desvio de trajetória indevido de uma das aeronaves resulte em risco potencial de colisão entre as duas aeronaves. Com este espaçamento, a aeronave que vem mais atrás possui uma margem maior de manobra para evitar uma colisão e abortar o procedimento de pouso, conforme necessário, caso ocorra um desvio não desejado da aeronave que vai a frente.

Há uma característica negativa principal na adoção deste procedimento, em especial para o cenário de pousos CSPA, pois a manutenção de distâncias laterais muito pequenas durante o procedimento inteiro de pouso exige a atenção contínua do piloto para esse aspecto, fator este que contribui indiretamente para piorar os riscos de segurança do pouso em si. Este risco é parcialmente evitado nos procedimentos SOIA e RNP (conforme explicado nas seções seguintes) pelo fato de que a distância lateral é mantida somente durante uma parte (final) do procedimento de pouso.

Figura 8 - Procedimento Convencional

2.4.2 Procedimentos SOIA

O SOIA (*Simultaneous Offset Instrument Approach*) é um procedimento de pouso, comumente trabalhando em conjunto com dois ILS, sendo um deles alinhado a uma pista e o

outro alinhado à outra pista, mas com um pequeno desvio angular

Figura 9), permitindo pousos em pistas paralelas com distâncias inferiores a 2.500 pés (aproximadamente 762 metros) (MAGYARITS, et al., 2001). Uma alternativa de implantação é o SOIA trabalhar em conjunto com dois ILS e um PRM que trabalham conjuntamente para garantir o pouso de duas aeronaves em pistas paralelas, de forma segura (MOSER, 2007). Esse sistema é abordado de forma separada neste trabalho, devido à sua forma especial de implantação, sendo apresentado a seguir.

Figura 9 - Procedimento SOIA

A adoção do SOIA possui como uma de suas principais vantagens a reutilização dos ILS já encontrados nos aeroportos modernos, reduzindo-se tanto o capital necessário para a sua

implantação, no caso do uso de apenas 2 ILSs, como o tempo de adaptação dos sistemas para esse tipo de procedimento. Já, dentre as suas desvantagens, encontra-se o escopo geográfico local da solução, pois uma implantação SOIA limita-se somente a um aeroporto, ocorrendo a necessidade de se realizar isso em todos os aeroportos individualmente para que comportem o uso do SOIA em grandes regiões geográficas, além da necessidade de se utilizar o PRM nas situações em que uma maior precisão é necessária, tornando a opção onerosa economicamente.

A composição ILS e PRM é feita de forma que cada ILS fica aproximadamente alinhado à trajetória de pouso de cada pista (conforme apresentado na

Figura 9), ou então os dois ILS ficam próximos de uma das pistas, sendo que o segundo ILS está angularmente defasado em relação ao primeiro ILS (MOSER, 2007). Este posicionamento dos ILS permite uma cobertura maior do que o PRM nas trajetórias de pouso de duas aeronaves, apesar de possuir uma precisão reduzida em relação ao PRM.

No caso do PRM utilizado no sistema SOIA, este serve como guia para garantir informações com maior precisão nas áreas imediatamente próximas às pistas de pouso, permitindo correções pontuais nas trajetórias das aeronaves nas etapas finais do procedimento de pouso, quando a distância entre aeronaves é mínima.

Conforme ilustrado na

Figura 9, durante um procedimento de pouso utilizando o SOIA, uma das aeronaves (Aeronave 2) mantém uma grande distância da outra aeronave (Aeronave 1) nos momentos iniciais do procedimento, aproximando-se, gradualmente, e realizando uma leve curvatura quando encontra-se bem próxima à pista. Note que o ILS 2 possui uma leve inclinação em relação ao ILS 1, com o intuito de cobrir a trajetória das aeronaves na etapa inicial de pouso.

2.4.3 Procedimentos RNP e RNAV

O RNP (*Required Navigation Performance*) é um tipo de navegação em que uma aeronave circula por trajetórias especificadas por meio de pontos de referência bem definidos no espaço aéreo (chamados de *waypoints*) e em que os equipamentos a bordo devem atender a determinados requisitos de desempenho na realização do monitoramento e na emissão de alertas quando do desvio de trajetória (NAVERUS, 2010).

Existe um procedimento similar ao RNP, chamado de RNAV (*RNP Area Navigation*), cuja diferença principal reside no tratamento dos pontos de referência. No RNP, os pontos de referência são locais por onde a aeronave necessariamente precisa sobrevoar para validar a trajetória, enquanto que no procedimento RNAV os pontos de referência são apenas indicadores de distância em relação à trajetória principal, permitindo uma flexibilidade com respeito a pequenas modificações de percurso (o que, em um cenário ideal, permite reduzir o tempo de viagem ou mesmo implica na economia de combustível).

No contexto do CSPA, o uso do RNP ou RNAV permite que sejam definidos pontos de referência para as trajetórias utilizadas nos procedimentos de pouso, o que pode ser utilizado como mais um procedimento para a realização de pousos no conceito CSPA.

Em conjunto com a denominação RNP ou RNAV, pode ser apresentado um número indicador do nível de desempenho do procedimento (FAA, 1998). Por exemplo, na denominação RNP 10, os equipamentos de bordo permitem identificar a posição instantânea da aeronave dentro de círculo com raio de 10 milhas náuticas (aproximadamente 18,5 km).

Historicamente, o procedimento RNP surgiu, inicialmente, nas pistas de pouso do Alasca onde, devido ao relevo montanhoso e à dificuldade em se encontrar trechos planos, houve a necessidade de se criar procedimentos de pouso que permitissem a uma aeronave realizar uma curva logo antes de realizar o pouso (NEWMAN, et al., 2007).

2.5 Considerações Finais deste Capítulo

Este capítulo apresentou uma visão geral sobre os componentes e técnicas utilizadas para as soluções que devem atender aos requisitos de segurança para a utilização do CSPA em aeroportos, visando o pouso simultâneo de aeronaves em pistas paralelas, exemplificando alguns de seus diferenciais e aspectos técnicos básicos.

A partir desta visão geral, pode-se vislumbrar a diversidade de abordagens e soluções utilizadas na implantação do CSPA em aeroportos no mundo. O conhecimento dessa variedade, em conjunto com os aspectos de segurança em tráfego aéreo e em pousos, apresentados no capítulo seguinte, constituem-se em elementos essenciais para a construção de modelos que possuam as variáveis cruciais para análise de segurança e avaliação do risco associado aos procedimentos CSPA.

3 Segurança em Tráfego Aéreo e em Procedimentos de Pouso

O intuito deste capítulo é apresentar conceitos gerais sobre segurança, com foco em tráfego aéreo e nos procedimentos de pouso de aeronaves, abordando os aspectos relevantes das normas, padronizações e técnicas que devem ser consideradas na elaboração de modelos de análise de risco em procedimentos de pouso.

Este capítulo é dividido em três partes principais, sendo a primeira parte relacionada aos aspectos de segurança encontrados na área de tráfego aéreo, em que os conceitos de confiabilidade, de segurança e de risco são apresentados, nesta ordem, para um melhor entendimento da etapa de determinação dos parâmetros e nível de risco. A segunda parte é dedicada aos aspectos de segurança relacionados aos procedimentos de pouso, que apresentam determinadas peculiaridades necessárias para compreender as margens de segurança, cenários de voo e a natureza das incertezas envolvidas para modelagem e avaliação de risco em um procedimento de pouso. A terceira parte é dedicada para a expressão que define o risco total associado à perda de separação lateral entre aeronaves, que corresponde a uma somatória considerando todas as contribuições para esse risco.

Os aspectos de segurança mencionados neste capítulo possuem relacionamento com os procedimentos e técnicas do CSPA apresentados no capítulo anterior. Nos casos em que este elo é mais forte, um detalhamento maior é realizado.

3.1 Segurança em Tráfego Aéreo

Nesta subseção, são enunciados os conceitos principais de risco e segurança que são utilizados nos capítulos seguintes, além de aspectos de segurança específicos para tráfego aéreo.

3.1.1 Conceitos de Risco e Segurança

Inicialmente, é fundamental conhecer a definição dos conceitos de confiabilidade, segurança e de risco. Esses conceitos são desenvolvidos ao longo deste trabalho com foco maior inicialmente em tráfego aéreo e, posteriormente, em procedimentos de pouso.

“Confiabilidade é a probabilidade condicional de que o sistema irá desempenhar corretamente no intervalo de tempo $[t_o, t]$, dado que o sistema estava desempenhando corretamente no instante t_o ” (JOHNSON, 1989) e (CAMARGO, 2007). Ou seja, é a probabilidade de um sistema operar corretamente em um determinado intervalo de tempo, sendo que o sistema estava operando corretamente em sua condição inicial.

“Segurança (Safety) é a probabilidade de que um sistema irá desempenhar suas funções corretamente ou descontinuar suas funções de uma forma que não interrompa a operação de outros sistemas de segurança e nem comprometa a segurança de pessoas” (JOHNSON, 1989) e (CAMARGO, 2007). Um sistema com alto nível de segurança apresenta a somatória de dois aspectos:

- Probabilidade do sistema de realizar a operação corretamente; e,
- No caso do sistema desviar de seu comportamento esperado, este vai para um estado seguro.

O conceito de segurança engloba não apenas a garantia de uma operação correta de um sistema, mas também de que este não vá para um estado inseguro, no caso de ocorrerem situações inesperadas.

Por outro lado, o conceito de risco é variado, conforme a literatura utilizada, pois o termo ‘risco’ é utilizado em diversas áreas, como de negócios, financeira, política, sistêmica, técnica, etc. Neste trabalho de pesquisa, é utilizada a seguinte definição para risco.

“Risco é um termo que cobre dois parâmetros. O primeiro é a probabilidade (ou taxa) de ocorrência de um evento em particular. O segundo é a escala da consequência (expressado em termos da fatalidade esperada)” (SMITH, 2001).

A definição de risco, neste caso, aborda dois pontos com respeito à sua avaliação:

- A probabilidade de ocorrência de um evento; e,
- O impacto da ocorrência deste evento.

A expressão matemática para o cálculo do risco pode ser enunciada conforme Equação 1 (SMITH, 2001),

$$Risco = P(E) * Im(E) \quad (1)$$

em que a medição do *Risco* é feita a partir das variáveis:

$P(E)$ = Probabilidade de Ocorrência do Evento.

$Im(E)$ = Impacto do Evento (número que varia entre 0, para nenhum impacto, e 1, para completo impacto).

No caso do Tráfego Aéreo, o impacto da ocorrência dos eventos normalmente é alto, ocasionando tanto um número elevado de fatalidades, com distúrbios de efeito social e econômico. Portanto, considerando-se que o impacto usualmente é alto, a expressão que calcula o risco se reduz apenas ao cálculo da probabilidade do evento, sendo que é adotado

$Im(E) = 1$ para simplificar a equação, cuja expressão resultante fica conforme a Equação 2, também apresentada em (OGATA, 2003).

$$Risco = P(E) = \frac{NR(E)}{N} \quad (2)$$

em que a medição do *Risco* é feita a partir das variáveis:

$NR(E)$ = número de cenários em que o evento E ocorre.

N = número total de cenários possíveis.

O adotado na Equação 2, utilizando a taxa de ocorrência de um evento com base no número total de cenários avaliados, é uma forma de expressar a probabilidade da ocorrência de um evento e está em linha com a métrica de medição de riscos que é adotada posteriormente na proposta do modelo de segurança.

Devido à natureza de utilização de probabilidades nos conceitos de Confiabilidade, Segurança e Risco, a ICAO definiu um sistema de coleta de dados de acidentes/incidentes, cujo intuito é que os dados históricos sirvam para definir e propor alterações nos sistemas de tráfego aéreo, de modo a reduzir o risco associado aos seus elementos e procedimentos (ICAO, 2008).

O resultado das iniciativas voltadas à redução dos riscos é apresentado na Figura 10. Nessa figura, apesar de se observar algumas variações positivas no número de fatalidades em alguns anos, é possível notar que, ao longo dos anos, ocorreu uma tendência de redução no número de fatalidades, especialmente devido às incorporações de melhorias em aspectos de segurança nos procedimentos e sistemas de tráfego aéreo em todo o mundo (ICAO, 2008).

Figura 10 - Média Histórica de Número de Fatalidades (ICAO, 2008)

Essa taxa de redução nos riscos não decresce continuamente até zerar o risco, pois como sempre existe uma probabilidade residual de ocorrer um evento (Equação 2), por mais seguro que um sistema seja, ele não apresentará risco zero.

Na avaliação de reduções de risco, um conceito relevante é o ALARP (*As Low As is Reasonably Practicable*), em que a redução de risco ocorre em intervalos toleráveis de risco e de viabilidade (muitas vezes econômica) (COX; TAIT, 1998). Na Figura 11, é explicitado o contraste entre redução de risco e o custo econômico, sendo que normalmente reduções graduais no nível de risco resultam em custos cada vez maiores para sua viabilização. A região em que se aplica o ALARP fica dentro da região de risco tolerável (dentro da margem de segurança), mas não cobre a região de risco extremamente baixo, devido ao alto custo envolvido. O ALARP é o intervalo viável de implantação de alternativas considerando-se também as limitações de ordem econômica, visando melhorias na medida da possibilidade de implantação, no caso dos sistemas de tráfego aéreo.

Figura 11 - Região ALARP e Questão Risco x Custo (adaptado de (COX; TAIT, 1998))

Pretende-se que, na proposição do modelo estendido de avaliação de risco de pousos em pistas paralelas, considerações sobre o ALARP sejam feitas no sentido de manter a praticidade na análise dos níveis de risco, para não se chegar em situações que não se justifiquem economicamente. Os aspectos econômico-financeiros não são abordados neste trabalho, em virtude de se tratar de uma análise de outra natureza, fugindo do escopo principal desta pesquisa, que é de calcular o risco de colisão entre aeronaves associado aos procedimentos de pouso CSPA.

3.1.2 Fatores de Incerteza no Voo

Para a avaliação de risco em uma operação de voo, torna-se necessária a definição das incertezas que estão envolvidas durante um voo, incertezas essas que, em sua composição, formam o conceito de envelope de conflito da aeronave (MENON, et al., 1997). O envelope de conflito corresponde a uma região no espaço ao redor da aeronave que representa as possíveis regiões em que a aeronave poderia estar posicionada, considerando-se as incertezas relacionadas ao voo.

A Figura 12 apresenta os principais fatores de incerteza que ocorrem durante um voo, segundo (REYNOLDS; HANSMAN, 2000), das quais se destacam as imprecisões de:

- **Posicionamento:** imprecisão do GPS e/ou equipamentos de navegação internos à aeronave;
- **Controlador:** variação no tempo de tomada de decisão do controlador de tráfego aéreo, ocasionando em um atraso (*delay*) na resposta;
- **Comunicação:** tempo de transferência de informações para a aeronave e de processamento por parte dos dispositivos internos de comunicação;
- **Piloto:** variação no tempo de resposta por parte do piloto para operacionalizar as ações;
- **Outros Fatores:** neste tópico, encontram-se as incertezas relacionadas às técnicas específicas ou aspectos não estimados de risco; e
- **Margem de Segurança:** considera-se uma margem de segurança sobre os fatores anteriores para casos extraordinários de situações de risco que não foram previstos a priori.

Os fatores de incerteza da Figura 12, quando em conjunto, representam espacialmente o conceito de envelope de risco, que se constitui na área mínima (considerando o plano horizontal em que se encontra a aeronave considerada) a qual outras aeronaves não podem invadir, sob o risco de que a aeronave considerada não tenha capacidade para realizar o desvio necessário, visando evitar uma eventual colisão entre elas. Segundo (REYNOLDS; HANSMAN, 2000), os padrões atuais na aviação norte-americana sugerem manter uma área

mínima de 1,5 a 2 milhas náuticas (entre 2.800 a 3.700 metros), considerando-se todas as incertezas possíveis.

Figura 12 - Fatores de Incerteza em um Voo
(adaptado de (REYNOLDS; HANSMAN, 2000))

O mapeamento dos componentes/técnicas do CSPA (apresentados no Capítulo 2) nestes fatores de risco permite obter informações a respeito de variáveis importantes de incerteza comuns a diversas opções utilizadas no CSPA. Este mapeamento é montado no Capítulo 5, quando são especificadas as variáveis de incerteza com base nos fatores de risco comuns nas implantações do CSPA.

3.2 Segurança em Procedimentos de Pouso

Nesta seção, são abordados especificamente os aspectos de segurança ligados aos procedimentos de pouso, que são parte dos conceitos de segurança de tráfego aéreo e contêm peculiaridades importantes que devem ser consideradas em modelos de avaliação de risco para pousos.

Estes aspectos específicos são três, colocados em subseções: **separação mínima entre aeronaves**, **procedimentos de pouso em pistas paralelas** e **efeitos de vórtice** (*wake vortex*).

3.2.1 Separação Mínima Entre Aeronaves

A separação mínima entre aeronaves, durante um procedimento de pouso, é um tópico extensivamente estudado, pois está diretamente relacionado ao nível de risco de maior peso na

ocorrência de incidentes de pouso, em casos de dimensionamento errôneo desta distância mínima.

Na primeira parte desta subseção, é apresentado um detalhamento sobre a distância longitudinal entre aeronaves, tratando-se do padrão historicamente utilizado para pousos, em que as aeronaves realizavam um enfileiramento e não ocorriam pousos com pareamento de aeronaves. Na segunda parte, são apresentados os dados de distância lateral, que é aplicada no contexto de pousos em pistas paralelas, em que esta distância impacta nos níveis de risco obtidos.

A distância mínima longitudinal entre aeronaves depende especialmente da categoria das duas aeronaves envolvidas que estão em procedimento de pouso em pistas paralelas (HINTON, et al., 2000). Essas distâncias mínimas estão especificadas na Tabela 2, em milhas náuticas¹² (NM), e podem servir como parâmetros iniciais para especificação da margem de segurança envolvida nesse processo. Neste presente trabalho de pesquisa, uma discussão em maior profundidade é conduzida quando da proposta de extensão do modelo de segurança, pois estas distâncias normativas devem ser ajustadas para o uso do CSPA ao se abordar o contexto dos diferentes aeroportos com pistas paralelas.

Analisando-se a Tabela 2, percebe-se que a ordem das aeronaves faz diferença com respeito à distância mínima que é utilizada. Isto é resultado dos efeitos de turbulência que ocorrem devido ao arrasto da aeronave líder¹³ que podem se propagar em direção à aeronave seguidora¹⁴. Quanto maior for a diferença entre o peso da aeronave líder em relação à aeronave seguidora, maior será a distância mínima requerida, pois há uma relação entre a intensidade da turbulência provocada e o tamanho da aeronave líder, efeito esse chamado de efeito de vórtice (*wake vortex*).

¹² 1 milha náutica (NM) equivale a 1.852 metros.

¹³ Utiliza-se o termo aeronave líder para designar a aeronave que vai a frente.

¹⁴ Utiliza-se o termo aeronave seguidora para designar a aeronave que vai atrás.

Tabela 2 - Tabela de Distâncias Mínimas por Categoria de Aeronave
(em milhas náuticas – NM)

Aeronave Seguidora	Aeronave Líder			
		Pequena	Grande	Pesada
	Pequena	3*	4	6
	Grande	3*	3*	5
	Pesada	3*	3*	4

Fonte: (HINTON, et al., 2000)

(*) A distância mínima pode ser de 2,5 NM, quando o tempo de aproximação da pista for menor que 50 segundos.

Ainda, a categorização das aeronaves, utilizada na Tabela 2, é com base no peso MTOW (*Maximum Takeoff Weight*¹⁵) da aeronave, segmentada nos seguintes intervalos (HINTON, et al., 2000):

- **Pequena:** peso inferior a 18.598 quilogramas;
- **Grande:** peso entre 18.598 e 115.668 quilogramas; e
- **Pesada:** peso superior a 115.668 quilogramas.

Com o advento do uso de procedimentos de pouso em pistas paralelas, foi necessário o desenvolvimento de técnicas que permitem a mensuração não apenas da distância longitudinal entre aeronaves, como também a distância lateral. O uso de técnicas que garantem maior precisão na obtenção do posicionamento das aeronaves (GPS/SBAS/WAAS/PRM) é uma das formas para se conseguir mensurar e até reduzir a separação mínima lateral entre aeronaves, mantendo-se os padrões de segurança exigidos. Na Figura 13, tem-se os gráficos de probabilidade de perda de separação de aeronaves em relação à distância mínima adotada utilizando duas técnicas distintas (GPS e o SSR – *Secondary Surveillance Radar*).

O SSR é um radar secundário, também chamado de *Long Range Radar*, comumente encontrado em aeroportos que possuem torre de comando e é responsável pela coleta de dados de posicionamento de aeronaves nos arredores do aeroporto em questão. Possui baixa precisão e taxa de amostragem dos dados comparado às técnicas atuais de obtenção de posicionamento

¹⁵ *Maximum Takeoff Weight*: é o peso máximo que uma aeronave deve possuir para que o piloto da aeronave tenha permissão para decolar.

das aeronaves. Um comparativo entre o SSR e o ADS-B foi apresentado anteriormente na Figura 6, em que se percebe a diferença especialmente nas taxas de amostragem entre as duas técnicas.

Na Figura 13, tem-se a análise da probabilidade de perda de separação lateral do GPS em dois modos (SA¹⁶ ativado ou desativado).

Figura 13 - Gráfico de Probabilidade de Perda de Separação x Distância Mínima (adaptado de (KROZEL, et al., 1997))

Compondo-se as técnicas (SSR e GPS), em (KROZEL, et al., 1997), obteve-se quatro cenários distintos de probabilidades de perda de separação entre aeronaves com respeito à distância lateral mínima fixada (nos dois cenários com o SSR, os dados foram obtidos de normas), ilustrado na Figura 13:

- **SSR En Route:** Neste cenário, a perda de separação ocorre quando as aeronaves estão em nível de cruzeiro. Ainda, impõe-se um aumento de distância lateral e longitudinal entre aeronaves devido à necessidade de maior espaço para manobra;

¹⁶ O SA (*Selective Availability*) foi um mecanismo adotado pelo governo norte-americano que introduzia erros no sinal obtido do GPS, com o intuito de deliberadamente reduzir sua precisão, para que as informações de posicionamento obtidas pelo GPS não pudessem ser utilizadas para guiar armas de guerra inimigas com grande precisão. Este mecanismo foi desativado em 1 de Maio de 2000, por decreto presidencial, e, atualmente, o sinal obtido é livre de erros introduzidos deliberadamente (ADRADOS *et al*, 2002).

- **SSR Terminal:** Este cenário cobre as etapas de procedimentos de pouso de aeronaves. A taxa de precisão do SSR é maior, quando comparado ao SSR *En Route*, para reduzir a chance de que ocorra uma perda de separação entre aeronaves no procedimento de pouso; e
- **GPS (SA *on/off*):** Ambos cenários consideram o uso de GPS, com ou sem o uso do SA (*Selective Availability*), e sua probabilidade associada de perda de separação lateral.

O uso das técnicas baseadas em GPS, para redução da probabilidade de perda de separação entre aeronaves, possibilita ganhos significativos em termos de segurança, em comparação com o uso do SSR. Por exemplo, se estabelecida uma distância mínima de 1 NM entre as duas aeronaves, a redução de risco obtida é da ordem de 10^{60} , comparando-se o GPS (SA *on*) e o SSR Terminal (ilustrada na Figura 13). Essa redução de risco é, principalmente, devida à maior precisão do posicionamento das aeronaves pelo GPS.

A ocorrência de perda de separação de aeronaves não indica, necessariamente, que esse evento ocasiona uma colisão entre aeronaves, mas sim que a margem de segurança (nesse caso, a distância mínima estabelecida) foi violada em algum instante de tempo do voo. Esse evento de perda de separação, em conjunto com outros fatores: *wake vortex*, erro humano, efeito meteorológico, entre outros, constituem o risco global no caso de procedimentos de pouso.

É possível calcular a probabilidade de perda de separação entre aeronaves por meio de distribuições estatísticas (OGATA, 2003), considerando-se que existe um evento perturbador que causa variações na trajetória da aeronave. Para o contexto de perda de separação, a parte importante da distribuição que contribui no fator risco fica na região entre as aeronaves, depois é a redução da distância entre aeronaves que aumenta as chances de que estas violem a distância mínima especificada. No sentido contrário, um desvio de trajetória que aumente a distância entre as aeronaves reduz as chances de perda de separação.

A separação mínima entre aeronaves pode ser dividida em dois componentes para efeitos de análise: a **separação lateral** e a **separação longitudinal**.

A Figura 14 ilustra a contribuição para o risco de violar a separação lateral mínima conforme a posição em que a aeronave está em relação à outra. Nota-se que quando a Aeronave A se

desvia para a direita (em sentido à outra aeronave), a contribuição da diminuição da separação lateral para a geração de uma possível colisão aumenta, enquanto que indo para a esquerda, a contribuição tende a zero. No caso de separações laterais, os efeitos principais que contribuem para sua variação são as incertezas no posicionamento momentâneo da aeronave e o sentido de navegação da aeronave.

Figura 14 - Distribuição Estatística de Trajetória (adaptado de (KROZEL, et al., 1997))

No caso da separação longitudinal, deve ser mantida tanto uma separação longitudinal mínima entre aeronaves, como uma separação longitudinal máxima, formando-se uma janela de segurança para o procedimento de aproximação/pouso das aeronaves em pistas paralelas (KING; KUCHAR, 2000). Esses dois tipos de separações são ilustrados na Figura 15.

A separação mínima deve ocorrer para reduzir os riscos de que a outra aeronave que vai a frente (líder), ao cometer algum desvio significativo de trajetória (*blunder*¹⁷), eventualmente entre em trajetória de colisão com a aeronave que vem atrás (seguidora), sendo que, neste caso, uma distância mínima longitudinal permitiria tempo suficiente para manobras evasivas de ambas as aeronaves.

Já a separação máxima ocorre devido aos efeitos de turbulência e arrasto (*wake vortex*) oriundos da aeronave que vai a frente (líder), de onde se propagam turbulências no ar e que podem afetar o comportamento da aeronave que vem a seguir (seguidora). Visando-se reduzir a ocorrência deste tipo de evento, uma distância máxima longitudinal entre as aeronaves é definida para evitar que a aeronave seguidora sofra os efeitos de turbulências da aeronave líder e, portanto, tenha um aumento na incerteza do seu posicionamento momentâneo.

¹⁷ O termo *blunder* é utilizado nas situações em que ocorre um desvio inesperado de trajetória da aeronave, podendo ser em virtude de erros operacionais ou falhas nos sistemas de navegação da aeronave.

Figura 15 - Ilustração da Separação Mínima Lateral e Longitudinal
(adaptado de (KING; KUCHAR, 2000))

3.2.2 Procedimentos de Pouso em Pistas Paralelas

Os procedimentos de pouso em pistas paralelas compreendem os modos e os tipos de trajetórias utilizadas pelas aeronaves durante um procedimento de pouso. A variação das trajetórias afeta diretamente a distância mínima entre as aeronaves pois, em alguns cenários, pode ocorrer uma redução gradativa da distância entre aeronaves, com o intuito de alinhá-las às respectivas pistas nos momentos finais dos pousos.

O levantamento dos procedimentos de pouso possíveis é importante para identificar quais cenários serão cobertos pela avaliação de risco e também para definir quais as possibilidades de trajetórias serão consideradas na análise de risco de colisão entre aeronaves.

A avaliação desses procedimentos de pouso em pistas paralelas, em situações como clima adverso, pode ser analisada em duas situações. Utilizando-se as técnicas tradicionais para pousos em pistas paralelas (somente ILS), em pistas com separação inferior a 2.500 pés (762 metros), apresentam perda de capacidade para pousos da ordem de 50%. Já em pistas com separação entre 2.500 e 4.300 pés (1310 metros), a perda de capacidade é de aproximadamente 25% (WALLER; SCANLON, 1999). A perda de capacidade nas duas

situações é equivalente à taxa de pousos em pista única, afetando o cenário convencional de pouso.

Para atenuar este problema de clima adverso, técnicas como o AILS (*Airborne Information for Lateral Spacing*) foram desenvolvidas para permitir que a detecção de possíveis cenários de colisão ou de perda de separação entre aeronaves. As aeronaves com o AILS possuem um DGPS (*Differential Global Positioning System*) embarcado para obtenção de posicionamento e um *link* ADS-B para comunicar a posição da aeronave para as demais aeronaves na vizinhança (WALLER; SCANLON, 1999) (ELLIOTT; PERRY, 2000). Em (SAMANANT; JACKSON, 2000), há mais detalhes sobre o funcionamento do AILS, com maior enfoque ao seu algoritmo de alerta.

Dentre outras soluções que toleram situações como clima adverso, encontra-se o uso do RNP e do SOIA, que constituem variações de tipos de cenários de pouso para análise de risco.

No caso de pousos utilizando o CSPA, há três tipos principais de procedimentos de pouso consideradas para as aeronaves: os procedimentos convencionais, os procedimentos RNP e os procedimentos SOIA (NEWMAN, et al., 2007).

O uso de trajetórias convencionais é ilustrado na Figura 16, em que ambas as aeronaves ficam pareadas durante todo o procedimento de pouso, com a restrição de que isto ocorre apenas quando há condições visuais para a observação da outra aeronave e da pista. O modelo de (OGATA, 2003), que será estendido neste trabalho, realiza uma simulação sobre este tipo de procedimento.

Figura 16 – Aeronaves Utilizando Trajetórias Convencionais
(adaptado de (NEWMAN, et al., 2007))

Já no uso de trajetórias do tipo RNP, ilustradas na Figura 17, as aeronaves ficam pareadas somente nos momentos finais do procedimento de pouso, pois uma das aeronaves permanece distante lateralmente e realiza uma leve curva em direção à outra aeronave quando se encontra já próxima à pista de pouso. Isto ocorre com o intuito de reduzir o tempo em que as aeronaves ficam pareadas, pois nesta situação as aeronaves ficam com uma distância muito reduzida e,

portanto, a minimização deste tempo em que as aeronaves ficam pareadas implica em risco menor de colisão entre aeronaves.

Figura 17 - Aeronaves Utilizando Trajetória RNP
(adaptado de (NEWMAN, et al., 2007))

Por fim, no caso de trajetórias do tipo SOIA, uma das aeronaves se aproxima pela diagonal e realiza o pareamento apenas quando bem próximo à pista. A diferença com relação à trajetória do tipo RNP é no formato da aproximação de uma das aeronaves, pois no RNP a curva é mais “suave”, enquanto que no SOIA a aproximação é mais “direta”. Isso se torna possível devido à defasagem entre os ILS e sua área de cobertura no caso SOIA, o que favorece a obtenção do posicionamento preciso da aeronave quando esta se aproxima, seguindo a área de cobertura ótima do ILS (aproximação “direta”).

Figura 18 - Aeronaves Utilizando Trajetória SOIA
(adaptado de (NEWMAN, et al., 2007))

Durante as etapas iniciais dos procedimentos de pouso RNP e SOIA, existe uma área entre as trajetórias das duas aeronaves chamada de NTZ (*No Transgression Zone*). Esta área possui como objetivo principal servir como uma separação “virtual” de segurança entre as aeronaves no início do procedimento de pouso, em que no caso de uma das aeronaves atingir esta área, o procedimento de pouso de ambas as aeronaves é abortado para não ocorrer uma operação de pouso insegura ou com risco potencial de colisão entre aeronaves.

3.2.3 Efeito de Vórtices (*Wake Vortex*)

O efeito dos vórtices, ou turbulência, é abordado neste tópico devido à sua contribuição nos riscos de pousos em pistas paralelas, apresentando-se de forma mais intensa conforme a distância entre as aeronaves se reduz, o que ocorre na etapa de pareamento das aeronaves, nos momentos finais de um procedimento de pouso. Atribui-se ao efeito dos vórtices o acidente ocorrido no voo 587 da *American Airlines*, em Novembro/2001, em Nova Iorque (SPENCE, et al., 2007). Esses vórtices estão presentes tanto nas etapas de decolagem como de pouso de aeronaves, especialmente nos momentos em que elas ficam muito próximas às outras aeronaves.

Os modelos de previsão ou propagação de vórtices obtiveram avanços significativos para definir margens de segurança de proximidade entre aeronaves. Porém, falta ainda a muitos destes modelos a explicação do comportamento e da dinâmica de formação/espalhamento dos vórtices, problemas considerados de difícil solução, devido à alta sensibilidade do vórtice a pequenas variações meteorológicas, atmosféricas e até mesmo de poluição.

Como o detalhamento dos modelos de vórtice foge do escopo deste trabalho, especialmente devido à falta de consenso e de modelos que expliquem satisfatoriamente seus aspectos básicos, são explicados os aspectos qualitativos de alguns modelos para mostrar resultados importantes a respeito e a extensão do avanço das pesquisas neste quesito.

Um dos modelos de vórtice mais completos e descritivos é o modelo AVOSS (*Aircraft Vortex Spacing System*), que modela os impactos do vórtice em relação aos principais fatores envolvidos na formação e propagação de vórtices. A partir deste modelo, podem ser obtidas as definições de espaçamento entre aeronaves com 5 a 10 minutos de antecedência, tempo pequeno, pois a previsão do comportamento dos vórtices é feita com base nos dados meteorológicos momentâneos, cujas pequenas variações impactam fortemente nos resultados obtidos do modelo, devido ao seu comportamento dinâmico (PERRY, et al., 2000). Em (HINTON, et al., 2000), há um detalhamento dos aspectos de projeto e estrutura utilizados no AVOSS.

No estudo de (HOLZAPFEL, 2003), avaliando a dinâmica de vórtices, obteve-se que a propagação de vórtices ocorre em duas etapas, a de difusão e a de decaimento:

- **Difusão:** Nesta primeira etapa ocorre o espalhamento do vórtice no espaço, e a força do vórtice cai lentamente com o tempo; e

- **Decaimento:** Nesta segunda etapa, o vórtice perde força rapidamente e seu espalhamento se reduz, ou seja, esta etapa é de rápido decaimento das forças do vórtice.

O conjunto destas duas etapas mostra que genericamente o comportamento do vórtice segue formato não linear e é constituído por etapas de força/propagação. Outros fatores citados anteriormente (composição da atmosfera, poluição, umidade) podem alterar fortemente a característica destas etapas.

No estudo de (ROSSOW, 2006a), é analisado o comportamento da turbulência gerada pelas asas de um avião, com respeito aos seus arredores. O surgimento de zonas de formação de vórtices é obtida pela contribuição de dois componentes: pelo eixo da asa e pelo formato da asa.

A partir apenas do eixo da asa, a deformação nas linhas do ar ocorre apenas na região em que o eixo da asa “corta” o ar, influenciando localmente em termos de deformação das linhas de ar.

Já quando analisado o comportamento somente pelo formato da asa, o resultado é bem distinto, pois ocorre a formação de linhas de ar internas e próximas à asa, além de uma deformação maior das linhas de ar. É desse componente que parte a contribuição maior para a formação dos vórtices que propagam a turbulência das aeronaves, sendo que essa deformação é maior conforme o tamanho da asa (ROSSOW, 2006a).

Em um estudo de 2006 do mesmo autor, baseando-se agora na dinâmica de duas aeronaves realizando pousos em pistas paralelas, foi obtido o intervalo de 4 a 10 segundos (ou 244 a 610 metros) de distância entre as duas aeronaves (no sentido longitudinal) para que os efeitos de vórtices não tivessem tempo de se propagar de forma significativa para a outra aeronave (ROSSOW, 2006b).

Outra forma de melhorar os cálculos de distância entre aeronaves, considerando-se a formação de vórtices, é a utilização de dados climatológicos em termos de orientação dos ventos. A partir dos dados dos ventos em uma região, é possível estimar mais precisamente a direção principal de propagação dos vórtices (nos modelos tradicionais de vórtices, é utilizado somente o cenário pessimista em que o vento atua em direção e sentido à outra aeronave, sempre transportando o vórtice em sua direção). As melhorias obtidas por esse método possibilitariam aumentos de capacidade na pista da ordem de 10%, com os mesmos níveis de segurança (ROSSOW, 2006b).

Por fim, um último método é utilizar técnicas de alta precisão (SBAS/GPS) de posicionamento de aeronaves, com o intuito de aumentar a taxa de pousos simultâneos em pistas paralelas. Isto deve ocorrer de modo que o pareamento mais preciso das aeronaves não permita que os vórtices se propagem com tempo suficiente para atingir a outra aeronave. Nessas situações, a separação longitudinal é muito reduzida (devido ao uso do SBAS/GPS) e as possibilidades do vento arrastar vórtices de forma a afetar outra aeronave são remotas (ROSSOW, 2006b).

Mesmo com os avanços obtidos nos modelos de vórtices, a ICAO ainda adota estudos e testes independentes para novos modelos de aeronaves, tais como o Airbus A380 e o Boeing B747-800, no que diz respeito ao impacto dos vórtices e da turbulência gerada nas outras aeronaves (ICAO, 2008)

3.3 Cálculo do Risco Total

Na seção 3.1, foi utilizada a Equação 2 para o cálculo de risco de separação entre aeronaves. Este risco é parte de um conjunto de fatores que podem resultar em uma colisão entre aeronaves, pois apenas a perda de separação entre aeronaves não é o único fator determinante de uma colisão entre aeronaves.

Em (OGATA, 2003), são especificados os outros fatores determinantes que integram o *Risco Total*, que trata basicamente da somatória das contribuições dos fatores de risco em uma colisão de aeronaves, e que devem ser considerados no cálculo de risco do sistema, enunciados na seguinte equação:

$$RiscoTotal = P(E).P(I).P(B).P(BL) \quad (3)$$

em que a medição do risco é realizada a partir das seguintes variáveis:

$P(E)$ = Probabilidade de Perda de Separação entre Aeronaves (valor medido pelo modelo estendido). Esta variável é a mais importante dentre as quatro variáveis que compõem o Risco Total, pois este valor é obtido no modelo estendido e incorpora em seu resultado as hipóteses, restrições e condições aplicadas do modelo estendido. O valor obtido reflete a taxa de pousos em que ocorre a perda de separação entre aeronaves, isto é, a quantidade de simulações de procedimento de pouso em que uma das aeronaves viola a separação mínima entre as duas aeronaves e invade a região de segurança da outra aeronave. Estes cenários são caracterizadas como situações inseguras de pouso.

$P(I)$ = Probabilidade de Intrusão por Alinhamento Crítico, ou seja, a probabilidade de ocorrer uma violação da distância mínima entre aeronaves quando ambas as aeronaves se encontram em uma mesma altitude. Neste modelo, é adotada uma estimativa pessimista de 100%, pois por hipótese, as aeronaves pousam sempre em uma mesma altitude.

$P(B)$ = Probabilidade de Intrusão (onde B é o evento de intrusão), ou seja, é a probabilidade de uma das aeronaves cometer um desvio de trajetória, invadindo o espaço de segurança da outra aeronave. Em (OGATA, 2003), é utilizada a estimativa de 1% para uma ocorrência.

$P(BL)$ = Probabilidade de Intrusão Não Recuperável (onde BL é o evento de *blunder* não recuperável). Em (HOUCK; POWELL, 2001) e (OGATA, 2003), é utilizado o valor de 0,2% como estimativa da probabilidade de uma aeronave invadir o espaço da outra aeronave e de não realizar a correção de sua trajetória.

A medição do *Risco Total* deve ser feita e comparada segundo algum critério de segurança para servir como índice de mérito para discernir entre alternativas CSPA ou mesmo separações de pista que não sejam satisfatórias em termos de risco. Para o caso de pousos com equipamentos de precisão, como o PRM, é utilizada a linha de corte de 1 acidente a cada 25 milhões de operações, ou seja, o *Risco Total* deve ser de até 4.10^{-8} colisões por pouso (HOUCK; POWELL, 2001). Posteriormente, durante a análise dos resultados obtidos, esta equação é utilizada para qualificar as técnicas CSPA adequadas, conforme a separação entre pistas adotada.

3.4 Considerações Finais deste Capítulo

Neste capítulo, foram apresentados inicialmente os conceitos principais de Segurança em Tráfego Aéreo, abordando os conceitos de Confiabilidade, Segurança e Risco, assim como aspectos como o ALARP, Fatores de Risco e Envelope de Risco.

A segunda parte deste capítulo abordou aspectos de Segurança para Procedimentos de Pouso, em que três aspectos principais foram detalhados: Separação Mínima Entre Aeronaves, Procedimentos de Pouso em Pistas Paralelas e Efeitos de Vórtices (*Wake Vortex*), ilustrando e especificando os pontos principais que são considerados quando da proposta de um modelo para avaliação de risco, apresentado no próximo capítulo.

Na terceira parte deste capítulo, foi apresentado o conceito de *Risco Total*, que abrange a somatória de todos os fatores de risco associados à perda de separação entre aeronaves, conceito este proposto e utilizado por (OGATA, 2003).

4 Modelos de Avaliação de Risco para Pousos

Com base nas técnicas/componentes do CSPA, apresentados no capítulo 2, e dos aspectos de segurança, apresentados no capítulo 3, um conjunto de modelos de avaliação de risco foram desenvolvidos por diversos autores com o objetivo de medir o nível de risco para situações bem específicas para CSPA. O intuito deste capítulo é mostrar o estado da arte dos modelos CSPA, utilizando-se as taxonomias de (KUCHAR; YANG, 2000) e (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009) para classificar didaticamente os modelos.

4.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentado o estado da arte em termos de modelos de segurança CSPA, discutindo com maiores detalhes tanto as principais abordagens dos modelos para avaliação de risco utilizadas, como as suas limitações em termos de escopo de atuação. Os modelos enunciados neste capítulo possuem, em comum, o fato de o cálculo de risco ser realizado em procedimentos e técnicas CSPA muito específicas.

O levantamento do modo de funcionamento das técnicas CSPA atuais possibilita uma visão geral dos requisitos básicos para a concepção de um modelo comparativo entre as diversas técnicas e procedimentos CSPA, o que tornaria a avaliação de risco flexível em termos de possibilitar a avaliação de cenários de pouso distintos por meio da mudança somente nas parametrizações do modelo.

Para possibilitar o entendimento dos aspectos envolvidos nos modelos de avaliação de risco atuais, nas próximas duas seções são apresentadas duas categorizações utilizadas para agrupar os modelos levantados, com o respectivo descritivo dos modelos mais relevantes e atuais, bem como a classificação do modelo utilizado neste trabalho.

4.2 Categorização de Modelos de Avaliação de Risco

Na próxima subseção, é apresentada uma das categorizações utilizadas para modelos de avaliação de risco, segundo (KUCHAR; YANG, 2000), descrevendo os principais aspectos de cada categoria de modelos. Na subseção seguinte é apresentada a classificação de (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009), criada para classificar os modelos em termos de técnicas de simulação adotadas.

As categorias descritas possuem, como exemplos, alguns modelos de avaliação de risco atuais, modelos estes que possuem características consideradas neste trabalho que estende o modelo de avaliação de risco proposto por (OGATA, 2003), apresentada no capítulo seguinte.

4.2.1 Categorização de (KUCCHAR; YANG, 2000)

No estudo realizado por (KUCCHAR; YANG, 2000), a categorização dos modelos de avaliação de risco são pautadas por seis características de simulação, a saber: Propagação de Estado, Dimensões Avaliadas, Detecção de Conflito, Resolução de Conflitos, Manobras de Evasão e Múltiplos Conflitos. Essas características são descritas na sequência.

A categorização dos modelos com base nessas seis características permite também saber rapidamente quais são as funcionalidades básicas que um modelo de avaliação de risco deve possuir e o escopo de atuação do modelo. No estudo, foram criadas algumas tabelas comparativas dos modelos avaliados, permitindo uma visão do estado da arte em termos de modelos da época. Estas tabelas encontram-se no Anexo C, para maiores detalhes do resultado do estudo de (KUCCHAR; YANG, 2000).

4.2.1.1 Propagação de Estado

A propagação de estado refere-se ao modo com que é projetada a trajetória futura da aeronave, sendo classificada em três tipos (nominal, pior caso e probabilística), conforme a Figura 19. Esta classificação é importante para delimitar o escopo de propagação das incertezas do modelo de segurança utilizado, que podem ser provenientes de condições atmosféricas, imprecisões dos equipamentos de navegação ou mesmo de erros operacionais.

Figura 19 - Tipos de Propagação de Estado (adaptado de (KUCCHAR; YANG, 2000))

No modo *nominal*, considera-se que não existem incertezas na trajetória da aeronave, ou seja, não há interferências ou turbulências decorrentes do procedimento de pouso.

Já no modo *pior caso*, é considerada uma área potencial e fixa em que uma aeronave pode se encontrar em um momento futuro, utilizando-se comumente regiões de formato circular, elipsoidal ou semicircular, conforme as incertezas utilizadas para posicionamento da aeronave

ao longo do procedimento de pouso. As incertezas utilizadas comumente neste modo possuem aspectos determinísticos, ou bem delimitados, para que seja definida uma área fixa de trajetórias futuras.

No modo *probabilístico*, ao invés de se determinar uma região fixa e potencial de posicionamento da aeronave, é utilizada uma distribuição de probabilidades de posicionamento. Neste modo, comumente as incertezas envolvidas não são determinísticas e podem variar muito ao longo da trajetória, o que exige uma análise cuidadosa na combinação destas incertezas para derivação da curva de probabilidades de trajetórias futuras da aeronave.

Dentre alguns exemplos de modelos importantes que se utilizam de tipos distintos de propagação de estado, encontra-se o modelo de (MENON, et al., 1997), utilizando o conceito de “envelope de risco”, em que é definida uma região no espaço ao redor de uma aeronave que não deve ser violada (o modelo segue o tipo *pior caso* de propagação de estado). Já o modelo de (OGATA, 2003) considera algumas incertezas oriundas de turbulência e obtenção de posicionamento de aeronaves, incertezas estas com distribuições de probabilidade, caracterizando-se o modelo como do tipo *probabilístico*.

4.2.1.2 Dimensões Avaliadas

Esta característica mede as dimensões de análise consideradas no modelo de segurança, em termos de uso do plano horizontal, vertical ou de ambos na avaliação dos níveis de segurança. No plano horizontal, são consideradas a latitude e a longitude das aeronaves, enquanto que no plano vertical é considerada a altitude das aeronaves.

O modelo de (OGATA, 2003) considera apenas o plano horizontal para avaliação de segurança, sendo que é adotado o cenário de pior caso para o plano vertical, em que ambas as aeronaves sempre estão em uma mesma altitude, para reduzir o número de graus de liberdade para evitar colisões e tornar o cenário de avaliação conservador.

Já o modelo de (SHORTLE, et al., 2004) utiliza os planos horizontal e vertical para a avaliação de segurança, devido ao uso do conceito de envelope de risco, utilizando as três dimensões espaciais para medir as probabilidade de colisão entre aeronaves.

4.2.1.3 Detecção de Conflito

A detecção de conflitos é uma característica que determina a capacidade ou não do modelo de segurança de alertar ou definir as situações de conflito (situações estas em que há uma chance potencial de colisão entre aeronaves). Essa detecção pode ocorrer tanto por intermédio de

verificações simples, tal como a medição da distância entre aeronaves, quanto pela utilização de submodelos de comportamento futuro das aeronaves para medição das probabilidades de colisão.

O modelo de (OGATA, 2003) é capaz de detectar conflitos, utilizando-se para isso da taxa de conflitos para obter o nível de segurança de pousos em procedimentos convencionais em pistas paralelas. A detecção é feita por meio do cálculo da distância entre aeronaves para cada passo de simulação, distância esta que, se violada, marca o cenário de pouso como “arriscado”.

4.2.1.4 Resolução de Conflitos

A partir da detecção do conflito, a resolução de conflitos é a indicação da capacidade do modelo suportar ou não a determinação de trajetórias de pouso ou procedimentos alternativos em presença do conflito, de forma a evitar o cenário de potencial risco de colisão entre aeronaves. A resolução de conflitos pode, por exemplo, gerar trajetórias novas com o intuito de separar rapidamente as aeronaves, evitando assim uma possível colisão.

O modelo de (OGATA, 2003) não suporta a resolução de conflitos, pois o objetivo desse modelo é a quantificação do risco, em que se assume como hipótese conservadora e pessimista que os cenários em que ocorre a violação da separação mínima entre aeronaves sempre levarão a colisão.

A utilização de técnicas para resolução de conflitos comumente é para modelos cujo objetivo principal é a obtenção de trajetórias de contingência em tempo real, para evitar cenários de colisão entre aeronaves, o que exige técnicas rápidas de cálculo de trajetórias nas três dimensões espaciais.

Nesta característica, os modelos são classificados em quatro subcategorias básicas: Prescrita, Otimizada, Campo de Força e Manual. Na Prescrita, as trajetórias de resolução já são fixadas a priori, ou seja, no caso de conflito, uma das trajetórias pré-definidas é utilizada. Na Otimizada, é utilizado algum mecanismo de geração de trajetória de resolução que envolva uma minimização de risco e maximização da distância das aeronaves, comumente envolvendo cálculos dinâmicos de trajetórias de pouso. Na de Campo de Força, as aeronaves são consideradas como partículas eletricamente carregadas em que se utiliza o princípio de repulsão de cargas iguais para determina a trajetória de resolução de conflitos. E por último, na Manual as trajetórias são definidas por heurísticas e intuição humana, fixando-se algumas trajetórias ou pontos de referência.

4.2.1.5 Manobras de Evasão

Esta característica considera a capacidade do modelo de sugerir, além da trajetória de evasão, as manobras necessárias para a evasão e consideradas para que o procedimento se concretize. As manobras podem fazer parte de uma combinação de ações ou de ações individuais de forma sequencial.

Dentre as manobras observadas no estudo, encontram-se o Giro (a aeronave muda a sua inclinação no plano horizontal), Mudança de Altitude (a aeronave muda sua inclinação no plano vertical) e Mudança de Velocidade. Quanto mais manobras o modelo consegue sugerir para evasão, maior é o número de graus de liberdade que uma aeronave possui para evitar o risco de colisão.

O modelo de (OGATA, 2003), neste quesito, não sugere manobras de evasão, pelo mesmo motivo apresentado na subseção anterior.

4.2.1.6 Múltiplos Conflitos

A detecção de múltiplos conflitos é útil para identificar a capacidade de o modelo enumerar as possibilidades de conflito entre aeronaves. Basicamente a classificação dos múltiplos conflitos se enquadra em duas categorias: *Por Par*, em que os conflitos entre aeronaves são analisados somente para o par que está realizando o procedimento de pouso em pista paralela, e *Global*, em que são considerados os conflitos possíveis não somente no par de aeronaves consideradas, mas também incluindo as aeronaves do espaço aéreo nos arredores.

O modelo de (OGATA, 2003) detecta apenas conflitos Por Par, em virtude da medida de risco utilizada neste modelo considerar somente os cenários de duas aeronaves por hipótese. Entretanto, o modelo pode ser adaptado para suportar a detecção de múltiplos, incluindo algumas ressalvas e análises adicionais com respeito à medição de risco, por se tratar de um cenário de avaliação de segurança mais amplo ao considerar mais aeronaves na análise.

4.2.2 Categorização de (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009)

Um segundo estudo, realizado neste trabalho e apresentado resumidamente em (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009), foi desenvolvido com dois objetivos principais: o primeiro deles é de incluir alguns modelos de avaliação de risco para pousos em pistas paralelas mais recentes do que os avaliados por (KUCCHAR; YANG, 2000), enquanto que o segundo objetivo é apresentar outra visão de categorização dos modelos de avaliação de risco, com base na natureza de técnica adotada para criação do modelo de risco. Este estudo serve

como uma contribuição para avaliação de modelos de risco para pistas paralelas, no sentido de acrescentar uma nova forma de categorizar os modelos de risco do estado da arte descritos na seção anterior. Nas próximas subseções, são apresentadas sucintamente algumas técnicas utilizadas por modelos de risco desenvolvidas nos últimos anos, com exemplos de modelos que utilizam as respectivas técnicas.

4.2.2.1 Modelos Estatísticos / Estocásticos / Probabilísticos

Nesta categoria de modelos são utilizadas técnicas probabilísticas ou estatísticas para a medição dos níveis de risco do procedimento de pouso. O seu uso é com base no acréscimo de distribuições de variáveis de forma a representar os fatores de incerteza dos parâmetros de voo e também de cenários raros de comportamento da aeronave, que poderiam representar situações potenciais de risco.

Dentre os modelos mais representativos desta técnica estão os modelos de:

- **(SHORTLE, et al., 2006)**: este modelo utiliza um *fit* estatístico¹⁸ sobre os tempos de pouso das aeronaves e de ocupação nas pistas de pouso para obtenção do comportamento de pouso das aeronaves, apresentando também critérios para tratamento e correção de dados;
- **(ANDREWS, 2001)**: este modelo utiliza, também, um *fit* estatístico dos tempos de pouso das aeronaves, utilizando o modelo de *Vandevenne*, em que são utilizadas duas variáveis de incerteza: uma associada ao erro de posicionamento da aeronave e a outra ligada aos *gaps* encontrados na alocação e pareamento de aeronaves, considerando que o planejamento de pouso também não é perfeito. A determinação do valor ótimo para essas duas incertezas é realizada via MLE¹⁹ (*Maximum Likelihood Estimation*); e
- **(OGATA, 2003)**: este modelo utiliza fatores de incerteza com base em distribuições estatísticas (posicionamento, velocidade e *Heading*²⁰ da aeronave) e a medição do risco é realizada por meio da medição da distância entre aeronaves pareadas, em que a

¹⁸ *Fit* Estatístico é uma técnica que visa obter os melhores valores para os parâmetros de entrada considerando um modelo com base em uma massa de dados de parâmetros de entrada e de saída. A qualidade dos valores obtidos depende diretamente da qualidade do modelo e dos dados utilizados.

¹⁹ MLE (*Maximum Likelihood Estimation*) é uma técnica semelhante ao *Fit* Estatístico, no sentido que ambos tentam obter os melhores valores de parâmetros de entrada, e diferindo no aspecto em que o MLE visa obter os valores dos parâmetros com base no valor mais provável, enquanto que o *Fit* Estatístico tende a utilizar um valor “médio” que seja satisfatório para a base de dados utilizada como um todo.

²⁰ *Heading*, neste trabalho de pesquisa, é a variação angular (ou inclinação) na trajetória de uma aeronave no plano horizontal de voo em um determinado instante de tempo. Este pode oscilar devido a condições atmosféricas locais ou por intervenção do piloto na trajetória de voo.

violação dos requisitos de distância mínima são considerados como potenciais situações de perigo.

4.2.2.2 Árvores de Falhas

Outra técnica utilizada para medição de risco é a utilização de árvores de falha, empregada em modelos tais como o proposto por (SHEPHERD, et al., 1997), na qual uma árvore de falha é construída mapeando-se os conjuntos de fatores que, em bloco, podem potencialmente resultar em falhas nos sistema.

Na Figura 20, é apresentado um exemplo de árvore de falhas, em que os fatores são as letras de A a D. Tais fatores são interligados por operações lógicas (E ou OU), ou combinações destas, de forma a representar o conjunto de fatores que resultariam em falhas de sistema. Por exemplo, na ocorrência de erros nos fatores A ou B, ocorre uma falha de sistema (Q)

Figura 20 - Exemplo de Árvore de Falhas (VESELY; ROBERTS, 1987)

O mapeamento dos fatores permite identificar relações indiretas entre os fatores de risco que, em uma análise mais direta, não relevariam cenários de falhas. Além disso, é possível estabelecer uma hierarquia ou organização de forma que a exibição da árvore seja amigável, permitindo a identificação dos principais caminhos críticos que levariam a uma falha.

4.2.2.3 Sistemas Multiagentes

O uso de sistemas multiagentes possui, como um de seus objetivos principais, a modelagem e a simulação dos aspectos de tomada de decisão distribuída, como ocorrem na interação entre pilotos e controladores de voo. No estudo de (DONOHUE, et al., 2004), são modeladas as

variáveis de decisão para a fila de procedimento de pouso e a interação entre piloto e controlador de voo, de forma com que cada um destes participantes atue como um agente autônomo para tomada de decisão.

Durante a etapa de construção da lógica de decisão de cada um dos agentes, as premissas e hipóteses adotadas impactam fortemente a forma com que a interação entre os agentes é realizada, pois o seu comportamento resultante no ambiente de simulação apresenta sensibilidade a pequenas variações nos modelos de decisão. Uma premissa adotada, visando simplificar a modelagem, é a consideração de que os tempos de comunicação entre os elementos constituintes do pouso são nulos ou muito reduzidos, visando evitar a complexidade na consideração da variável tempo na tomada de decisão.

4.2.2.4 DCPNs (*Dynamically Colored Petri Nets*)

A utilização dos DCPNs (*Dynamically Colored Petri Nets*) é realizada, atualmente, no âmbito da modelagem de aspectos complexos entre variáveis durante um procedimento de pouso, de forma a encapsular detalhes da implementação matemática em estados, preservando o formalismo e permitindo a visualização tanto dos aspectos de alto-nível (interação das aeronaves com os demais componentes do modelo), quanto de baixo nível (interação dos componentes com os sistemas físicos, envolvendo as fórmulas matemáticas e restrições físicas).

No trabalho de (SHORTLE, et al., 2004), uma DCPN é construída para modelar as etapas de pouso de uma aeronave, conforme ilustrado na Figura 21, em que os círculos são os estados possíveis da aeronave durante o procedimento de pouso (estados este com o encapsulamento da complexidade matemática envolvida no cálculo), com base na disponibilidade do sensor de pista.

Figura 21 - Exemplo de DCPN (adaptado de (SHORTLE, et al., 2004))

4.3 Considerações Finais deste Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as categorizações de (KUCCHAR; YANG, 2000) e de (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009), com o objetivo de descrever o estado da arte em termos de modelos de avaliação de risco para procedimentos de pouso, além de apresentar critérios de classificação úteis para a compreensão da proposta de extensão do modelo de (OGATA, 2003) e posicionar a proposta com relação ao que até então foi pesquisado e desenvolvido.

5 Proposta de Extensão de Modelo de Avaliação de Risco para Pousos em Pistas Paralelas (CSPA)

Este capítulo possui como objetivo principal enunciar e detalhar a proposta de extensão de um modelo de avaliação de risco para CSPA, modelo este que se utiliza do método de simulação de Monte Carlo em ambiente de desenvolvimento MATLAB. Para isto, são especificadas as características do modelo de referência (Ogata, 2003) e a extensão proposta com as variáveis utilizadas, hipóteses adotadas e restrições previstas no modelo de risco.

5.1 Introdução

A partir das técnicas e procedimentos do CSPA (seção 2.3) e dos seus aspectos de segurança (seção 3.2), observa-se que há um número razoável de abordagens para adotar o CSPA nas quais é necessário atender aos aspectos de segurança.

Os modelos desenvolvidos encontrados na literatura para avaliação de risco no CSPA possuem foco específico em apenas uma ou duas técnicas ou procedimentos específicos de aproximação (KUCCHAR; YANG, 2000), impossibilitando uma análise comparativa e abrangente do risco dentre as diversas técnicas e procedimentos CSPA.

Essa dificuldade em realizar comparativos entre procedimentos CSPA surge principalmente a partir do grande número de variáveis contendo incertezas envolvidas na análise, da necessidade de uniformizar a análise para cenários de implantação CSPA distintos entre si e da necessidade de definição de uma métrica de risco genérica para a avaliação de segurança.

Com base neste panorama, a seguir é descrita, inicialmente, o modelo de (OGATA, 2003), utilizado como referência para a proposta de extensão do modelo de análise de risco para pousos em pistas paralelas, que é o foco deste trabalho de pesquisa. Nas demais seções, há o detalhamento das diferenças nas variáveis envolvidas, do algoritmo utilizado e das hipóteses e restrições de extensão propostas em relação ao modelo de (OGATA, 2003). Por fim, na última seção, é apresentada uma tabela que ilustra qualitativamente as principais diferenças entre o modelo de (OGATA, 2003) e a proposta de extensão de modelo apresentada neste trabalho.

5.2 Modelo de Avaliação de Risco de (OGATA, 2003)

O modelo de risco de (OGATA, 2003) foi proposto com o intuito de avaliar o nível de risco de segurança envolvido em cenários de pousos em pistas paralelas, utilizando-se procedimentos convencionais e técnicas ILS/PRM.

O cálculo de risco neste modelo de segurança é obtido pela análise de um número grande de pousos, acrescentando-se as incertezas associadas ao movimento da aeronave. A métrica avaliada é a chance de perda de separação entre aeronaves durante procedimentos de pouso simultâneos em pistas paralelas, em que cada pouso é considerado um cenário diferente na simulação.

Na Figura 22, é ilustrada uma situação de perda de separação entre aeronaves. No caso, a Aeronave 2 se desvia da trajetória ideal (linha contínua preta) e invade a região que delimita a separação mínima entre aeronaves que deve ser mantida, representando uma situação de risco de colisão com a Aeronave 1. Situações como essa podem ocorrer por diversos motivos, dentre os quais: desatenção ou imperícia do piloto da Aeronave 2, efeitos de turbulência na Aeronave 2, imprecisão sobre o posicionamento atual da Aeronave 2 ou falha de componentes de navegação.

Figura 22 - Ilustração de Situação de Perda de Separação entre Aeronaves

Durante cada pouso é calculado, para cada instante de tempo, a posição atual de ambas as aeronaves. Considerando-se as incertezas envolvidas no posicionamento das aeronaves, verifica-se a ocorrência ou não de perda de separação entre elas.

A geração do grande número de cenários para avaliação de risco é feita utilizando-se o método de Monte Carlo para este modelo de segurança, devido à sua aplicação em problemas cuja solução analítica seja difícil de obter e/ou em problemas que possuem um número de variáveis elevado, ou seja, com espaço amostral de possibilidades com grandes dimensões (PHAM, 2003).

O método de Monte Carlo consiste, basicamente, em utilizar números aleatórios (randômicos) para as variáveis de incerteza (respeitando-se suas respectivas distribuições de probabilidades), sobre um número estatisticamente grande de cenários representativos. O

intuito disto é reduzir a necessidade de uma simulação do tipo “força-bruta”, avaliando todas as possibilidades, e permitir que uma amostragem, desde que bem conduzida, obtenha um resultado aceitável em uma fração do tempo de processamento necessário em caso de avaliação exaustiva de todos os casos. Maiores detalhes sobre o método de Monte Carlo encontram-se no Anexo A deste trabalho.

O ambiente de desenvolvimento escolhido para executar as simulações é o MATLAB, devido à facilidade para programação da lógica envolvida no cálculo de risco (há um conjunto de funções que criam as distribuições de incertezas mais comuns) e que permitem explorar o paralelismo das máquinas que vão hospedar o processamento, quando a simulação é executada em máquinas com arquitetura compostas por múltiplos processadores/núcleos, obtendo ganhos significativos no tempo de processamento do algoritmo de cálculo de risco. Maiores detalhes sobre os aspectos de programação em MATLAB e das otimizações visando aumento de desempenho podem ser encontrados no Anexo B.

5.3 Proposta de Extensão de Modelo de Avaliação de Risco para CSPA

A proposta deste trabalho de pesquisa é apresentar uma extensão ao modelo de avaliação de risco de (OGATA, 2003) e, como principal diferencial desta proposta, permitir um comparativo entre diversas alternativas de técnicas CSPA no tocante ao risco de colisão entre as aeronaves, realizando-se para isto o cálculo do risco associado à perda de separação entre aeronaves durante o procedimento de pouso em pistas paralelas.

Esse cálculo de risco é comparado, inicialmente, com o modelo de (OGATA, 2003), no caso de pousos convencionais em CSPA, analisando-se o impacto da variação da distância entre pistas no *Risco Total*, utilizando-se os mesmos parâmetros e características principais desse modelo de (OGATA, 2003). Essa comparação tem como objetivo reproduzir as condições estabelecidas por (OGATA, 2003) para a avaliação dos riscos em operações de pouso em pistas paralelas, de forma que possa haver, na sequência, uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo estendido de avaliação de risco em outros procedimentos CSPA, como o SOIA (seção 2.4.2) e o RNP (seção 2.4.3), além de outras técnicas CSPA, como o SBAS (seção 2.3.4) e o ADS-B (seção 2.3.3), que não foram abordadas no trabalho de (OGATA, 2003). O Capítulo 6 descreve com maiores detalhes todos os cenários previstos neste trabalho para análise com a extensão proposta para o modelo de avaliação de risco de (OGATA, 2003).

Nas duas subseções seguintes, são detalhados dois pontos em maior profundidade: os principais diferenciais qualitativos da presente proposta em relação ao modelo de (OGATA,

2003) e aos demais modelos de avaliação de risco existentes, além do posicionamento desta proposta em relação às classificações de (KUCHAR; YANG, 2000) e (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009).

5.3.1 Diferenciais da Proposta de Extensão do Modelo de Avaliação de Risco

Para um maior detalhamento sobre a proposta do modelo de avaliação de risco, é necessário mencionar os diferenciais deste modelo com respeito aos demais modelos do estado da arte em avaliação de risco em CSPA mencionadas no capítulo 4.

Dentre os principais diferenciais em relação aos modelos tradicionais, constam:

- **Flexibilidade:** a extensão de modelo proposta e o modelo de (OGATA, 2003) possuem as principais variáveis de incerteza envolvidas em um procedimento de pouso, variáveis estas levantadas no estudo de (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2010) e apresentadas na forma de um mapeamento entre fatores de risco e variáveis de incerteza na seção 5.4. Com esse mapeamento, foi possível constatar que as variáveis utilizadas podem ser aplicadas para avaliação de outras implantações específicas do CSPA (tais como o procedimento SOIA e RNP, em conjunto com as técnicas ADS-B e SBAS), apenas ajustando-se às distribuições e valores das variáveis.
- **Comparabilidade:** devido à flexibilidade do modelo em suportar a análise em implementações específicas do CSPA, o uso da métrica de perda de separação entre aeronaves serve como um indicador comparativo de risco para as várias alternativas de técnicas e procedimentos relacionados ao CSPA.

Em relação ao modelo de (OGATA, 2003), vale constatar alguns diferenciais importantes, especialmente devido ao uso deste modelo como base de comparação para comparação no cenário específico de pousos convencionais com o uso de ILS/PRM:

- **Possui “Memória”:** o modelo estendido possui “efeito memória” das incertezas utilizadas no instante de tempo imediatamente anterior do algoritmo, ou seja, quando uma aeronave apresentar uma variação em sua trajetória devido a incertezas, o passo seguinte do algoritmo calcula as próximas incertezas com base no posicionamento obtido no instante de tempo anterior. O modelo de (OGATA, 2003) não possui este aspecto, pois é adotada a hipótese de que a incerteza apresentada sempre ocorre a partir de uma trajetória ideal em qualquer instante de tempo, ou seja, as incertezas são calculadas somente sobre essa trajetória ideal e não se acumulam ao longo da

simulação. A presença de memória no modelo permite avaliar cenários em que ocorrem diversos erros de trajetória consecutivos ou cumulativos ao longo do pouso, tornando o modelo mais flexível em seus resultados, além de permitir a análise da forma com que os erros se acumulam ao longo de um procedimento de pouso. No código do MATLAB, o uso da memória no modelo é aplicado ao considerar as coordenadas das aeronaves do passo anterior de simulação, acrescentando o deslocamento realizado durante o instante subsequente de tempo de simulação, incluindo-se as incertezas.

- **Permite Mudança nas Trajetórias:** a possibilidade de alterar as trajetórias, conforme o cenário de avaliação adotado é essencial para a avaliação de risco em técnicas CSPA que se utilizam de manobras para a realização do pareamento de aeronaves. Comumente, os modelos adotados fixam a trajetória das aeronaves em seus algoritmos, tornando difícil a alteração destes para permitir o comparativo entre trajetórias distintas. A mudança de trajetória foi aplicada no código por meio do acréscimo de uma variável de *Heading* da aeronave, que pode variar ao longo do tempo, de forma a realizar a trajetória desejada, e também por meio de uma nova parametrização das coordenadas iniciais das aeronaves, pois em procedimentos de pouso distintos, as aeronaves partem de posições iniciais diferentes.

Esses diferenciais entre a proposta deste trabalho e o modelo de (OGATA, 2003) explicam as principais diferenças encontradas nos resultados do comparativo do cenário de pousos convencionais, cenário este detalhado no capítulo 6 e analisado no capítulo 7.

5.3.2 Categorização do Modelo Utilizado

Com relação à categorização da proposta com base nos estudos de (KUCCHAR; YANG, 2000) e (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009), apresentadas no capítulo anterior, as características desta proposta são apresentadas resumidamente na Tabela 3.

Tabela 3 - Categorização da Proposta conforme (KUCCHAR; YANG, 2000)

Característica	Característica do Modelo Estendido
Propagação de Estado	Probabilístico
Dimensões Avaliadas	Plano Horizontal
Detecção de Conflito	Possui Detecção de Conflitos
Resolução de Conflitos	Não Possui Resolução de Conflitos
Manobras de Evasão	Não Possui Manobras de Evasão
Múltiplos Conflitos	Não Detecta Múltiplos Conflitos

Na categorização de (KUCCHAR; YANG, 2000), a proposta deste trabalho constitui-se em um modelo em que o cálculo da próxima posição das aeronaves baseia-se em distribuições probabilísticas, as dimensões avaliadas são apenas as do plano horizontal (latitude e longitude), possui detecção de conflitos (que é a medida de risco utilizada neste trabalho), mas não possui capacidade de resolução de conflitos, de propor manobras de evasão e nem de detectar múltiplos conflitos. A ausência de capacidade do modelo proposto nos últimos três itens é devido à natureza do modelo a ser simulado a priori, pois a aplicação do modelo é no sentido de quantificar antecipadamente o risco em cenários distintos de implantações CSPA, o que é diferente dos modelos que são calculados em tempo-real e junto às aeronaves, em que a presença de capacidades como resolução de conflitos e de manobras de evasão são essenciais para elevar o nível de segurança dos procedimentos de pouso.

Na categorização de (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2009), assim como o modelo de (OGATA, 2003), a proposta utiliza principalmente técnicas estatísticas e probabilísticas para definir o comportamento da aeronave durante o procedimento de pouso, em que as incertezas ocorrem basicamente no posicionamento, velocidade e *Heading* da aeronave. Para simular essas incertezas, são empregadas distribuições estatísticas para modelar o comportamento dinâmico das variáveis (parâmetros da aeronave).

Na próxima seção é feito o mapeamento entre os fatores de risco identificados na seção 3.1 e as variáveis de incerteza utilizadas no modelo estendido, além de detalhar as distribuições de incerteza utilizadas.

5.4 Mapeamento das Variáveis Utilizadas na Extensão Proposta ao Modelo de Avaliação de Risco

Conforme apresentado na seção 3.1, são especificados seis fatores de incerteza, a saber: **Posicionamento, Comunicação, Piloto, Controlador, Outros Fatores e Margem de Segurança**. Esses fatores de incertezas são utilizados para a obtenção da posição de uma aeronave e devem ser dimensionados apropriadamente para refletir as condições determinantes do risco de segurança envolvido em procedimentos de pouso CSPA.

Para facilitar o entendimento da escolha das variáveis utilizadas na extensão proposta para o modelo de pousos em pistas paralelas, um mapeamento foi realizado entre os fatores de incerteza e as variáveis de incerteza utilizadas no modelo (MATSUYAMA; CUGNASCA, 2010). Esse mapeamento foi necessário para avaliar a possibilidade de se utilizar as variáveis de incerteza previstas no modelo de (OGATA, 2003) em outros cenários de implantações CSPA, de forma a adaptar o modelo utilizado para que sejam necessários alguns ajustes nos valores e distribuições de probabilidades utilizadas nas variáveis do modelo, sem a necessidade de se alterar estruturalmente o código do modelo utilizado.

Na Tabela 4 é apresentado, resumidamente, o mapeamento adotado das variáveis de incerteza, onde se pode notar que o fator Controlador e o fator Piloto estão fora do escopo deste trabalho. Isto ocorre devido à complexidade inerente à modelagem dos aspectos humanos envolvidos na interação dos controladores de voo e do piloto da aeronave com os demais participantes dos procedimentos de pouso, tópicos relevantes para a área de Psicologia e Usabilidade, o que foge do foco deste trabalho de pesquisa, que é para uma abordagem mais quantitativa na modelagem de risco. No trabalho de (OGATA, 2003) são feitas algumas ressalvas com respeito à modelagem dos aspectos humanos nos procedimentos de pouso e, em linha com este trabalho, os fatores Controlador e Piloto foram também mantidos fora de escopo e durante as simulações, o Controlador e o Piloto são considerados como ideais, com o tempo de reação instantâneo (igual a zero).

Tabela 4 - Mapeamento entre Fatores e Variáveis de Incerteza

Fator de Incerteza	Variável de Incerteza
Posicionamento	Velocidade <i>Heading</i>
Comunicação	Precisão do Posicionamento
Piloto	Fora do Escopo
Controlador	Fora do Escopo
Outros Fatores	Velocidade <i>Heading</i>
Margem de Segurança	Separação entre Aeronaves

Na parte de **Posicionamento**, há uma parcela das distribuições de velocidade e do *Heading* referentes à incerteza do posicionamento da aeronave no procedimento de pouso.

Em **Comunicação**, foi definida uma variável relacionada à precisão obtida no posicionamento da aeronave, pois a obtenção dos dados de posicionamento da aeronave é através do meio de comunicação utilizado da respectiva técnica CSPA utilizada (ADS-B, SBAS ou PRM, por exemplo). Neste fator, é apenas considerada a informação de precisão do posicionamento obtida, considerando como ideais os aspectos de latência e de rede do canal de comunicação (é considerado que o tempo de entrega da informação é nulo).

No fator **Margem de Segurança**, a Separação entre Aeronaves atua como variável de quantificação do risco no modelo utilizado. A partir dos valores de risco obtidos nas simulações, é conduzida a análise quantitativa e comparativa dos cenários propostos no Capítulo 6, e também é apresentando as situações que apresentam um nível de risco aceitável para que a operação de pouso seja realizada de forma a atender os parâmetros de segurança normativos.

A parte **Outros Fatores** incorpora as incertezas oriundas de aspectos técnicos específicos de uma implantação CSPA, tais como a mudança utilizada nas trajetórias para os procedimentos SOIA e RNP, que atua especialmente na variável *Heading*, acrescentando mais uma componente, que é a inclinação horizontal da aeronave.

Com o mapeamento realizado entre os fatores de incerteza e as variáveis utilizadas no modelo estendido, é possível observar preliminarmente três limitações que impediriam a simulação de

todos os comportamentos possíveis que poderiam ocorrer às aeronaves durante um procedimento de pouso real.

A primeira limitação é a desconsideração dos fatores humanos envolvidos durante um pouso, pois estes fatores podem eventualmente potencializar o risco calculado por este modelo em casos como, por exemplo, de um piloto não seguir todos os procedimentos operacionais recomendados ou no caso de um controlador transmitir instruções errôneas. Estas duas situações-exemplo não são mensuradas pelo modelo estendido por serem consideradas fora de escopo.

A segunda limitação ocorre na definição das variáveis de incerteza para fatores de incerteza como o de comunicação, pois em cenários reais de pouso, existe uma interação dinâmica e não ideal entre os componentes de comunicação, em que devem ser considerados os aspectos de latência, *jitter*²¹ e taxas de erros de transmissão entre os dispositivos de comunicação. Neste trabalho, estes aspectos são considerados também como fora de escopo.

A terceira limitação são nas variáveis consideradas indiretamente como incertezas, tais como as incertezas devido a condição atmosférica local e as condições estruturais das aeronaves. Neste caso, estas incertezas foram consideradas indiretamente nas incertezas de posicionamento, velocidade e *heading*, adotando-se valores conservadores que podem resultar em cenários mais pessimistas do que o encontrado em cenários reais de pouso.

Vale mencionar que, por hipótese, as incertezas são aplicadas a somente uma das aeronaves, sendo que a outra aeronave serve como de referência, ou seja, uma das aeronaves possui fatores determinísticos de movimento, enquanto na outra aeronave são aplicadas as incertezas. Esta hipótese também foi adotada por (OGATA, 2003) em seu modelo.

A partir do mapeamento utilizado, parte-se para a determinação das distribuições de incertezas a serem alocadas para cada variável obtida, que é descrito nos itens a seguir. Todas estas distribuições também são adotadas por (OGATA, 2003), com os mesmos valores.

- **Precisão do Posicionamento:** é a incerteza da precisão na obtenção da posição atual da aeronave. A distribuição utilizada é uma curva normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 11$ m (CARPENTER; KUCHAR, 1997);

²¹ *Jitter*: é a variância na quantidade de tempo para a entrega de pacotes de mensagens entre dois dispositivos de rede.

- **Velocidade da Aeronave Seguidora:** a velocidade de uma aeronave pode sofrer variações devido a efeitos atmosféricos, rajadas de vento e efeito de vórtices (seção 3.2.3). A distribuição utilizada é uniforme, com variação de 57 a 88 m/s (CARPENTER; KUCHAR, 1997) e (WALLER; SCANLON, 1999); e
- **Heading:** a variação no *heading* pode ocorrer por motivos semelhantes aos da velocidade. É utilizada uma distribuição normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$, mais uma variação de -40° a $+40^\circ$, em passos de 10° (CARPENTER; KUCHAR, 1997). Estas variações de 10° são para representar as situações em que ocorrem rajadas de vento e o efeito de vórtices, situações estas em que a aeronave pode mudar bruscamente de inclinação.

A seguir, são descritas as variáveis determinísticas utilizadas no modelo. São três variáveis, uma relacionada à velocidade da aeronave líder, outra com respeito à distância mínima de separação de aeronaves e, finalmente, o ponto de início²² do procedimento de pouso. Novamente, essas variáveis e valores foram adotados também por (OGATA, 2003).

- **Velocidade da Aeronave Líder:** velocidade constante de 72 m/s (HOUCK; POWELL, 2000);
- **Distância Mínima de Separação entre Aeronaves:** distância de 150 m (WALLER; SCANLON, 1999); e
- **Ponto de Início do Procedimento de Pouso:** é feita a uma distância de 11.100 m da pista (OGATA, 2003).

As variáveis de incerteza, conforme o cenário comparativo utilizado, podem ser alteradas de forma a refletir a precisão e as características das técnicas CSPA utilizadas. Nos cenários de pousos convencionais, são utilizados os mesmos valores que (OGATA, 2003). Já nos demais cenários, alguns valores são modificados para refletirem o contexto da respectiva implantação CSPA e são apresentadas em maior detalhe no capítulo 6.

Na Figura 23, são ilustradas as variáveis e incertezas utilizadas para o cálculo do risco no modelo estendido na aeronave seguidora, que servem como guia para compreensão do fluxo do algoritmo apresentado a seguir.

²² **Ponto de início do procedimento de pouso:** é equivalente às condições iniciais de posicionamento e de velocidade das aeronaves no começo de cada simulação. Esses pontos de início representam o começo da etapa de procedimento de pouso na simulação.

Figura 23 - Diagrama com as Principais Variáveis Utilizadas no Modelo Estendido

Durante a etapa de geração das distribuições estatísticas que representam as incertezas adotadas no modelo estendido, inicialmente é utilizado um gerador de números pseudoraleatórios do MATLAB, com período²³ de 10^{450} , similar ao utilizado por (OGATA, 2003). A partir dos números gerados, são utilizadas as funções estatísticas do MATLAB que mapeiam os valores pseudoaleatórios em valores que seguem as respectivas distribuições estatísticas utilizadas no modelo estendido.

A seguir, é feita a descrição do algoritmo do modelo estendido, apresentando inicialmente um fluxograma que explica como ocorre o cálculo do risco e posteriormente, ocorre uma descrição das equações utilizadas que relacionam as variáveis com o risco obtido nas simulações.

5.5 Descrição do Algoritmo do Modelo Estendido

Da mesma forma que no modelo de (OGATA, 2003), o algoritmo completo foi escrito na linguagem MATLAB. O código referente ao programa de simulação que implanta o modelo estendido para a avaliação do risco em pouso de aeronaves em pistas paralelas encontra-se no Anexo B. Nesta seção, é feito um descritivo, em alto nível, dos principais aspectos presentes

²³ O período nos geradores de números pseudoaleatórios se refere à quantidade de números que devem se gerados para se obter um valor que seja exatamente igual ao primeiro valor (valor inicial) gerado. O valor do período é aproximadamente o inverso do valor da sensibilidade do gerador de números pseudoaleatórios.

no algoritmo estendido para esse modelo estendido. O código utilizado não é igual que o aplicado por (OGATA, 2003), em virtude das diferenças apresentadas anteriormente.

Com o intuito de facilitar a visualização da lógica envolvida, o fluxograma da Figura 24 ilustra os blocos principais de processamento utilizados pelo algoritmo no cálculo do risco.

Figura 24 - Fluxograma do Algoritmo Estendido Utilizado no Modelo Estendido

Esse fluxograma é composto basicamente por sete passos, descritos a seguir:

1. **Inicialização das Variáveis:** neste bloco, é feita a inicialização das variáveis determinísticas (posição longitudinal e lateral inicial das aeronaves, velocidade da aeronave líder, *Heading* da aeronave seguidora), do contador de colisões, o número de simulações e de iterações adotado;
2. **Inicialização dos Vetores de Incertezas:** nesta etapa, são obtidos os vetores de incertezas com todos os valores de incertezas (velocidade, *Heading* e posicionamento da aeronave seguidora) a serem utilizados para uma simulação (os valores são obtidos todos a priori, apenas por questões de eficiência computacional, para aumentar a velocidade dos cálculos nas etapas seguintes);

3. **Laço com o Passo da Simulação:** basicamente é um laço que executa, repetidamente, a lógica de verificação do risco e de atualização das posições das aeronaves até o término da simulação, ou seja, quando as duas aeronaves pousam;
4. **Cálculo da Posição Atual das Aeronaves (Parte 1):** neste bloco, primeiramente é feita a atualização da posição da aeronave líder nas coordenadas laterais e longitudinais (por hipótese, não se calcula na coordenada de altitude, como é exposto na seção seguinte). As Equações 4 e 5, representadas graficamente na Figura 25, descrevem as equações cinemáticas para a aeronave líder (aeronave A). As equações determinam um movimento uniforme na coordenada longitudinal (coordenada X) e movimento nulo na coordenada lateral (coordenada Y), pois por hipótese, a aeronave líder não possui incertezas associadas ao seu movimento, conforme apresentado na seção seguinte. É considerado que o passo de simulação é de 1 segundo, ou seja, $\Delta t = 1s$. Logo, a posição atual é calculada a partir da posição anterior, após 1 segundo.

$$posicao_atual_Ax = posicao_anterior_Ax + velocidade_A * \Delta t \quad (4)$$

$$posicao_atual_Ay = posicao_anterior_Ay \quad (5)$$

Figura 25 - Representação Gráfica das Equações 4 e 5

4. **Cálculo da Posição Atual das Aeronaves (Parte 2):** a segunda etapa neste bloco é a atualização da posição da aeronave seguidora nas coordenadas laterais e longitudinais. As Equações 6 e 7, representadas graficamente na Figura 26, descrevem as equações cinemáticas para a aeronave seguidora (aeronave B). As equações determinam um movimento que, em parte, é semelhante ao da aeronave líder, com o acréscimo das incertezas apresentadas nas variáveis de velocidade, *heading* e posicionamento da aeronave (vide seção 5.4 para saber as distribuições de incertezas utilizadas para estas variáveis). Note que a composição das incertezas dos eixos X e Y resulta na posição da aeronave seguidora no próximo passo de simulação.

$$posicao_atual_Ax = posicao_anterior_Ax + \sum incertezas_Ax \quad (6)$$

sendo que o somatório das $incertezas_Ax$ é:

$$\sum incertezas_Ax = velocidade_B * \cos(heading) * \Delta t - posicionamento_B * \sin(heading)$$

$$posicao_atual_Ay = posicao_anterior_Ay + \sum incertezas_Ay \quad (7)$$

sendo que o somatório das $incertezas_Ay$ é:

$$\sum incertezas_Ay = velocidade_B * \sin(heading) * \Delta t - posicionamento_B * \cos(heading)$$

Figura 26 - Representação Gráfica das Equações 6 e 7

5. **Cálculo da Distância entre Aeronaves:** nesta etapa, a partir das posições nas coordenadas X (longitudinal) e Y (lateral) obtidas das aeronaves líder e seguidora, é calculada a distância euclidiana entre as aeronaves;
6. **Risco de Colisão ou Final de Simulação?:** Neste bloco, é verificado se a distância obtida na etapa anterior viola o requisito de separação mínima entre aeronaves (vide seção 5.4 para saber o valor utilizado). Caso ocorra esta violação, o contador de colisões é incrementado de um e esta simulação termina, passando para a próxima simulação, se houver. Caso não ocorra nenhuma violação, o algoritmo incrementa o passo de simulação e volta para a etapa 3, sendo que no caso final (quando todos os passos foram simulados), o algoritmo finaliza a execução da simulação sem incrementar o contador de colisões, pois não houve situação na qual foi violada a distância mínima entre aeronaves; e
7. **Incrementa Contador de Colisão ou Termina Simulação:** as explicações para esta etapa estão embutidas na explanação da etapa anterior.

A partir da descrição do algoritmo utilizado no modelo estendido, é necessário ressaltar as hipóteses adotadas, assim como as restrições para a aplicação deste modelo, informações estas que são apresentadas a seguir.

5.6 Hipóteses Adotadas e Restrições do Modelo Estendido

Dentre as hipóteses principais adotadas para o modelo estendido, constam:

- Não é considerado o efeito da rotação da Terra e nem da curvatura terrestre. Estas duas hipóteses são consideradas razoáveis para aviões que operam em um raio de até 200 milhas náuticas (aproximadamente 370 quilômetros), pois os seus efeitos são considerados desprezíveis (MENON, et al., 1997). No caso do modelo estendido, como a distância simulada é de aproximadamente 11 quilômetros, pode-se claramente desprezar esses efeitos. Esta hipótese é uma consideração adicional neste trabalho, em relação ao trabalho de (OGATA, 2003), no sentido de esclarecer o contexto de pouso utilizado e a consideração necessária da curvatura terrestre no caso de trajetórias longas.
- As duas aeronaves, a aeronave líder e a aeronave seguidora, realizam o procedimento de pouso em uma mesma altitude. Esta é, ao mesmo tempo, uma simplificação e a adoção de um cenário pessimista. A simplificação ocorre na redução do escopo de análise de risco, que passa de três dimensões (altitude, latitude e longitude) para duas dimensões (latitude e longitude, apenas), devido à difícil modelagem da forma em que a altitude se comporta quando as aeronaves estão pousando. A adoção de mesma altitude representa um modelo pessimista, que levaria em tese a mais situações de conflito, o que é razoável em termos de análise de risco (pelo conservadorismo), pois as aeronaves possuem apenas dois graus de liberdade (latitude e longitude) para reduzir o risco de perda de separação entre elas, devido ao valor fixado de altitude retirar o grau de liberdade referente à altura em que as aeronaves se encontram. Esta hipótese foi também adotada por (OGATA, 2003).
- As incertezas ocorrem em somente uma das aeronaves, no caso, na aeronave seguidora. Esta hipótese foi assumida para centrar a análise na contribuição das incertezas em apenas uma das aeronaves, evitando a necessidade de verificar o comportamento dinâmico na combinação de incertezas de duas aeronaves. Ao adotar que uma das aeronaves seja a líder, ou seja, sem incertezas associadas, é possível

medir o risco de perda de separação entre aeronaves em relação a uma aeronave que segue uma trajetória ideal, o que simplifica o cálculo do risco durante o procedimento de pouso. Esta hipótese foi também adotada por (OGATA, 2003) e é razoável em termos de análise, pois em cenários em que há a mudança de trajetória (procedimentos SOIA e RNP) é possível isolar os efeitos do risco na aeronave seguidora que realiza a manobra de inclinação da aeronave, o que altera o seu *Heading*.

- O tempo de obtenção de dados do posicionamento da aeronave é instantâneo, ou seja, não são considerados neste modelo os aspectos relacionados ao tempo de aquisição das informações, pois em situações reais existem atrasos para realizar a leitura dos dados, processamento, transmissão e exibição dos dados. Esta hipótese é uma consideração adicional neste trabalho, considerada indiretamente no trabalho de (OGATA, 2003), sendo necessária para limitar o escopo de incertezas de técnicas tais como o ADS-B e SBAS, que incluiriam incertezas de propagação de sinal.
- O comparativo entre técnicas CSPA depende fortemente da qualidade das informações, em especial da distribuição de incertezas utilizadas, de forma a obter resultados confiáveis e que reflitam os cenários reais. Esta limitação é mencionada no trabalho de (OGATA, 2003).

O modelo estendido não considera os aspectos relacionados ao comportamento humano do Piloto ou dos Controladores de Voo durante um procedimento de pouso, sendo estes de escopo de outras áreas do conhecimento humano, tal como nos ramos de Psicologia, Ergonomia e/ou Usabilidade. Esta restrição foi adicionada como resultado do mapeamento dos fatores de incerteza (seção 5.4 e 3.1.2), para estabelecer o escopo de incertezas envolvidas e abordadas na proposta. Portanto, para este trabalho de pesquisa, tanto o Piloto como o Controlador de Voo são considerados ideais, com tempo de reação igual a zero e que não realizam intervenções corretivas sobre a trajetória da aeronave. Esta hipótese é conservadora e pessimista, pois as ausências de intervenção do Piloto e do Controlador de Voo implicam os efeitos das incertezas. Este capítulo apresenta a proposta de modelo de segurança, detalhando seus diferenciais em relação aos modelos atuais, assim como são apresentadas as variáveis que são utilizadas no modelo e o algoritmo utilizado para o cálculo de risco. São também listadas as principais hipóteses utilizadas e restrições previstas para o modelo estendido. Este capítulo também evidencia as principais características adicionais deste modelo estendido em relação ao modelo de (OGATA, 2003).

5.7 Resumo das Características do Modelo Estendido Utilizado e o Modelo de (OGATA, 2003)

Na Tabela 5, são sucintamente descritas as diferenças e semelhanças entre o modelo de (OGATA, 2003) e a proposta de extensão de seu modelo, o que pode servir de guia para melhor compreensão das contribuições deste trabalho de pesquisa.

Cada diferença deste trabalho de pesquisa, em relação ao trabalho de (OGATA, 2003), é localizada dentro desta dissertação, no local onde é mais explorada do ponto de vista de detalhamento.

Tabela 5 - Diferenças e Semelhanças entre os Modelos de (OGATA, 2003) e a Proposta de Modelo Estendido

Fatores	Modelo de (OGATA, 2003)	Proposta de Extensão de Modelo
Medida do Risco	Distância Mínima entre Aeronaves	Distância Mínima entre Aeronaves
Procedimentos de Pouso Analisados	Pouso Convencional	Pouso Convencional e SOIA (Capítulo 6)
Técnicas Analisadas	ILS/PRM	ILS/PRM, ADS-B e SBAS (Capítulo 6)
Trajectoria	Incertezas sobre uma trajetória ideal	Incertezas sobre a posição anterior da aeronave (efeito memória) (Seção 5.3.1)
Variáveis	Seção 5.4	Mesmas variáveis que (OGATA, 2003) (Seção 5.4)
Incertezas	Seção 5.4	São utilizadas as mesmas incertezas de (OGATA, 2003) para o cenário Convencional com ILS/PRM (Seção 5.4) Para os demais cenários, as novas incertezas são apresentadas no Capítulo 6
Hipóteses Adotadas	Seção 5.6	São utilizadas basicamente as mesmas hipóteses de (OGATA, 2003) (Seção 5.6)
Restrições do Modelo	Seção 5.6	São utilizadas as mesmas restrições de (OGATA, 2003), acrescentando a restrição da proposta <u>não</u> abordar o comportamento do piloto e do controlador de voo (Seção 5.6)
Mapeamento dos Fatores de Risco	Não Possui	Possui um mapeamento dos fatores de risco, pois ele é necessário para verificar se a proposta possui flexibilidade para simular procedimentos e técnicas CSPA distintas (Seção 5.4)

5.8 Considerações Finais deste Capítulo

Este capítulo apresenta a proposta de modelo de segurança, detalhando seus diferenciais em relação aos modelos atuais, assim como são apresentadas as variáveis que são utilizadas no modelo e o algoritmo utilizado para o cálculo de risco. São também listadas as principais hipóteses utilizadas e restrições previstas para o modelo estendido. Este capítulo também evidencia as principais características adicionais deste modelo estendido em relação ao modelo de (OGATA, 2003).

6 Método de Análise e Cenários de Avaliação da Proposta de Modelo Estendido

Este capítulo detalha o método de análise aplicada para avaliar os resultados obtidos e também os cenários de avaliação que são utilizados na proposta de modelo estendido, visando um estudo comparativo com o modelo não estendido. Na parte de metodologia, são apresentadas considerações a respeito da quantidade de simulações e das linhas gerais de análise, enquanto que, na parte de cenários de avaliação, são especificadas as parametrizações das técnicas CSPA utilizadas respectivamente para cada cenário.

6.1 Introdução

A partir da proposta de modelo de segurança, apresentada em maiores detalhes no Capítulo 5, é necessário inicialmente definir a abordagem e a metodologia a serem utilizadas para a obtenção e análise dos resultados obtidos pelo modelo estendido. Sem a devida estruturação metodológica, corre-se o risco de obter resultados que não apresentam proximidade com a realidade ou que são inócuos em termos de análise e relevância.

Outra consideração, feita na sequência, é a descrição dos cenários de avaliação utilizados, especificando as parametrizações realizadas, de forma a se ter um panorama do que é esperado como resultados obtidos do modelo estendido, assim como esclarecer quais cenários são comparados.

6.2 Método de Análise

Nesta seção, é especificada a metodologia utilizada para parametrizar os cenários, assim como da validação dos resultados obtidos no modelo estendido, consistindo em um conjunto de etapas sequenciais, detalhados a seguir:

1. **Definição dos Parâmetros de Segurança:** Nesta primeira etapa, é especificado o coeficiente de risco adotado neste trabalho, calculo este derivado do modelo de (OGATA, 2003), considerando o conceito de *Risco Total* (seção 3.3) com ajustes para considerar, em especial, o “efeito memória” do modelo utilizado;
2. **Levantamento dos Cenários de Pouso:** Nesta etapa, são especificados os cenários de pouso a serem utilizados para o comparativo entre Técnicas CSPA. Um descritivo destes cenários é feito na seção seguinte;

3. **Levantamento das Técnicas CSPA para Comparativo:** A partir do levantamento dos Cenários de Pouso, é necessário definir as Técnicas CSPA envolvidas nesta avaliação comparativa. A definição das Técnicas CSPA utilizadas nesses comparativos é especificada na seção seguinte;
4. **Parametrização dos Cenários de Pouso:** Com a definição do panorama das simulações (as duas primeiras etapas servindo como descrições de alto nível), a parametrização dos cenários é realizada, com o intuito de apresentar as distribuições ou valores utilizados nas variáveis do modelo que não são exibidas na seção de variáveis do modelo estendido (seção 5.4), por serem de uso específico de uma Técnica CSPA ou Cenário utilizado;
5. **Critério de Número de Simulações:** Com as parametrizações realizadas, é necessário definir um número de simulações adequado para representar, da forma mais fiel possível, as condições reais de pouso. Nos casos em que se utiliza o Método de Monte Carlo (como no modelo proposto por (OGATA, 2003) e também no modelo estendido nesta pesquisa), conforme o número de simulações tende ao tamanho do espaço amostral do modelo, o resultado obtido converge²⁴ para o resultado encontrado ao se simular todas as combinações possíveis. Portanto, é importante dimensionar corretamente o número de simulações para que essa convergência resulte em um número próximo ao encontrado na simulação completa de todas as combinações possíveis de entradas no modelo. Como, inicialmente, não se sabe este número, no primeiro comparativo é avaliado o resultado obtido conforme se aumenta a ordem de grandeza do número de simulações utilizado no modelo estendido, analisando se a convergência está ocorrendo ou mesmo se o número obtido se estabiliza;
6. **Obtenção dos Dados de Risco dos Cenários:** A partir das simulações feitas, é obtido o cálculo do risco do cenário em estudo, que calculado como sendo a proporção dos cenários em que houve risco de colisão entre aeronaves, em relação a todas as simulações realizadas. A precisão obtida neste cálculo é dependente do número de simulações realizado, e será discutido adiante neste trabalho; e

²⁴ A convergência ocorre pelo fato de que um número cada vez mais elevado de simulações tende a obter um resultado que seria equivalente à simulação de todas as combinações possíveis de entradas no modelo.

7. **Avaliação e Análise dos Resultados:** Com os dados obtidos, realiza-se a devida análise dos resultados, verificando sua coerência e o impacto das variáveis nos níveis de risco obtidos.

A partir dessas etapas do método, são efetuados agora os cálculos do coeficiente de risco utilizado neste trabalho e, na sequência são realizadas as etapas 2, 3 e 4 deste método, especificando-se os cenários de pouso, as técnicas CSPA utilizadas nos comparativos e a parametrização utilizada em cada um dos cenários. No capítulo seguinte são tratadas as etapas 5, 6 e 7 deste método, focando nas discussões dos aspectos analíticos do trabalho e dos resultados obtidos.

6.3 Cálculo do Coeficiente de Risco

Nesta seção são detalhados os cálculos dos coeficientes de risco ajustados em relação ao apresentado em (OGATA, 2003), com base na Equação 3 e nas informações apresentadas na seção 3.3. Novamente, as variáveis que compõem o *Risco Total* são:

- $P(E)$ = Probabilidade de Perda de Separação entre Aeronaves (valor medido pelo modelo);
- $P(I)$ = Probabilidade de Intrusão por Alinhamento Crítico²⁵;
- $P(B)$ = Probabilidade de Intrusão;
- $P(BL)$ = Probabilidade de Intrusão Não Recuperável.

A Intrusão por Alinhamento Crítico (I) existe quando ocorre a violação da distância mínima entre aeronaves em uma mesma altitude. A Intrusão (B) propriamente dita corresponde ao desvio indevido da trajetória, invadindo o espaço de segurança da outra aeronave. Já a Intrusão Não Recuperável (BL) significa um cenário em que ocorre um *blunder* de uma das aeronaves de forma que ocorre a invasão do espaço da outra aeronave e não ocorre uma correção de sua trajetória.

Na equação do *Risco Total*, têm-se os valores $P(I)$, $P(B)$ e $P(BL)$, apresentados a seguir, restando apenas obtenção do valor de $P(E)$. O valor de $P(E)$ é o risco calculado pelo modelo; portanto, o valor de $P(E)$ derivado deste cálculo serve de indicador do nível de risco aceitável para pousos simultâneos em pistas paralelas, de forma a atender os requisitos normativos de segurança, como a taxa de colisões entre aeronaves em relação ao número realizado de pousos

²⁵ **Alinhamento Crítico:** este tipo de alinhamento entre aeronaves acontece principalmente durante a etapa de pouso, em que pareamento das aeronaves ocorre em altitudes iguais para ambas as aeronaves.

em pistas paralelas (valor utilizado para *Risco Total*). Na Tabela 6, são apresentados os valores utilizados tanto no modelo de (OGATA, 2003), quanto no modelo estendido neste trabalho. Note que há diferenças devido aos ajustes necessários, explicitados a seguir.

Tabela 6 - Comparativo dos Valores Adotados para Obtenção do $P(E)$ – Modelo de (OGATA, 2003) x Modelo Estendido

Variável	Modelo de (OGATA, 2003)	Modelo Estendido
Risco Total	4.10^{-8}	4.10^{-8}
$P(I)$	100%	100%
$P(B)$	1%	0,1%
$P(BL)$	0,2%	0,2%
.		
$P(E)$	$0,8.10^{-2} \%$	$0,8.10^{-1} \%$

A mudança nos valores obtidos de $P(E)$ é derivada da diferença na estimativa da variável $P(B)$ – *Probabilidade de Intrusão*, pois o modelo estendido neste trabalho possui “memória”, o que resulta em um número maior de intrusões. Assim, há o efeito da propagação de erros, necessitando de ajustes nessa probabilidade para que a distância mínima aceitável obtida seja equivalente entre o modelo estendido e o modelo de (OGATA, 2003). Na literatura, não foram encontradas informações de como obter o $P(B)$ para uso em modelos de aproximação de aeronaves com propagação de erros nas trajetórias das aeronaves (efeito memória). Portanto, é realizado um teste com um valor estimado que posteriormente é comparado aos resultados do modelo de (OGATA, 2003), de forma a obter um valor de $P(B)$ coerente para uso nas simulações dos demais cenários.

Para efeito de teste, é adotado inicialmente o valor de 0,08% para a $P(B)$, cujo *Risco Total* é utilizado no modelo estendido no cenário comparativo com o modelo de (OGATA, 2003). A partir do cálculo da distância entre pistas aceitável para atender a taxa de 4.10^{-8} colisões por pouso no comparativo, espera-se que as distâncias aceitáveis obtidas sejam semelhantes, o que tornaria o valor do $P(B)$ ajustado mais confiável para utilização nos demais cenários.

6.4 Cenários de Avaliação de Risco de Colisão

Os casos de avaliação de risco de colisão entre duas aeronaves pousando simultaneamente em pista paralelas CSPA, utilizados para os comparativos, foram separados em cinco cenários distintos, ilustrados na Tabela 7, em que cada um dos cenários marcados é detalhado nas

subseções a seguir, com a especificação da forma com que o cenário é simulado, o conjunto de procedimentos de pouso e técnicas CSPA considerado e a parametrização das variáveis utilizadas nos respectivos cenários.

Tabela 7 - Mapeamento dos Cenários de Avaliação de Risco de Colisão

Técnica			
Procedimento	ILS / PRM	ADS-B	SBAS
Convencional	Avaliado	Avaliado	Avaliado
SOIA	Avaliado	Não Avaliado	Não Avaliado
RNP	Discutido	Não Avaliado	Não Avaliado

Na Tabela 7, nota-se que nem todas as combinações de técnica e procedimento de pouso são avaliadas neste trabalho de pesquisa, pois o foco foi na análise isolada da variação na precisão do posicionamento da aeronave (primeira linha de avaliação) e depois, da variação da trajetória utilizada (primeira coluna de avaliação). Esta análise isolada de cada uma das variações permite estabelecer comparativos entre os cenários com base em apenas uma variável característica (trajetória ou precisão do posicionamento), com o intuito de verificar qual contribuição de cada um dos dois em termos de redução de risco. Portanto, um conjunto menor, mas não menos relevante de cenários foi considerado, visando estabelecer comparativos significativos no modelo estendido.

O conjunto inteiro de técnicas (ILS/PRM, ADS-B e SBAS) é considerado nas simulações somente com relação aos procedimentos convencionais de pouso, com o objetivo de medir a sensibilidade dos parâmetros de precisão no posicionamento da aeronave com relação à medida de risco e distância entre pistas.

Analogamente, o mesmo ocorre com os procedimentos (Convencional, SOIA e RNP), sendo simulados somente com a técnica ILS/PRM, para medir a sensibilidade da trajetória no risco de colisão, variando-se também a distância entre pistas. No caso do RNP, devido à ausência de parametrizações na literatura acadêmica e normativa, este cenário não será avaliado. Entretanto, considerações sobre os possíveis resultados para o RNP são realizadas na etapa de análise, devido à sua semelhança em relação ao procedimento SOIA. Os demais cenários não foram considerados na sua plenitude, neste trabalho, podendo ser alvo de futuros trabalhos de pesquisa.

6.4.1 Pousos Convencionais entre o Modelo de (OGATA, 2003) e o Modelo Estendido

Inicialmente, é realizada uma análise comparativa entre os resultados encontrados no modelo estendido e o modelo de (OGATA, 2003), com o intuito de servir como uma evidência de que a construção do algoritmo segue as mesmas características básicas do modelo de (OGATA, 2003). O comparativo é feito com base no risco de colisão obtido conforme se varia a distância entre pistas paralelas, utilizando-se um número crescente de simulações para verificar a convergência dos valores de risco no método de Monte Carlo. As conclusões obtidas a respeito do número de simulações ideal são utilizadas posteriormente nos demais cenários, de forma a evitar repetições desnecessárias de análise sobre o aspecto de como obter um valor ótimo para o número de simulações.

Este cenário consiste na utilização de trajetórias de pouso em pistas paralelas e alinhadas às respectivas pistas, conforme a Figura 16. As premissas e restrições são as mesmas que as apresentadas na seção 5.6, assim como a parametrização das variáveis seguem as distribuições e valores da seção 5.4. As parametrizações utilizadas nas incertezas e variáveis estão ilustradas na Tabela 8 e Tabela 9, sendo que neste cenário foram adotadas as mesmas parametrizações, tanto no modelo utilizado, quanto no modelo de (OGATA, 2003). As referências utilizadas para obtenção dos valores e distribuições estatísticas adotadas estão presentes na seção 5.4.

Tabela 8 - Parametrização das Incertezas

<u>Incerteza</u>	Modelo de (OGATA, 2003)	Modelo Estendido
Posicionamento	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 11$ m	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 11$ m
Velocidade (Aeronave Seguidora)	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s
Heading	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10^{26}	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10°

²⁶ Conforme apresentado anteriormente, estas variações de 10° são para representar as situações em que ocorrem rajadas de vento e o efeito de vórtices, situações estas em que a aeronave pode mudar bruscamente o seu Heading. Isso vale para todos os cenários.

Tabela 9 - Parametrização das Variáveis

<u>Variáveis</u>	Modelo de (OGATA, 2003)	Modelo Estendido
Separação Mínima entre Aeronaves²⁷	150 m	150 m
Velocidade (Aeronave Líder)	72 m/s	72 m/s
Ponto Inicial	11.100 m da Pista	11.100 m da Pista

O resultado esperado do comparativo neste cenário é que os valores de risco obtidos nos dois modelos sejam próximos entre si, especialmente no caso em que as pistas paralelas estejam bem próximas, pois o efeito memória do modelo proposto tem importância reduzida devido ao fato de que um desvio momentâneo da aeronave seguidora já causaria, com grande probabilidade, uma violação da separação mínima entre a aeronave líder e a aeronave seguidora. Considera-se que a diferença marginal seja atribuída aos fatores mencionados na seção 5.3.1, em especial o efeito memória.

6.4.2 Pousos com SOIA e ILS/PRM

Neste cenário é realizado um comparativo entre o uso de procedimentos tradicionais de pousos em pistas paralelas (a Figura 16 ilustra este procedimento) e os procedimentos utilizando o SOIA com a técnica ILS/PRM. Para isto, são aproveitadas as informações obtidas de risco em pousos tradicionais do cenário anterior (já considerando os resultados utilizando o modelo estendido proposto), para efeito de comparação com os resultados obtidos em novas simulações parametrizadas para o caso de utilização do SOIA. O cenário SOIA não é abordado no trabalho de (OGATA, 2003), pois em seu trabalho o foco foi somente na área de pousos convencionais.

Para o cenário do SOIA, foram feitas as seguintes modificações nas hipóteses, nas incertezas e nas variáveis utilizadas, descritas a seguir:

- **Hipótese Adicional:** é considerado que o *Heading* utilizado no SOIA para a aeronave seguidora, para a realização da convergência das trajetórias das aeronaves, é constante e ocorre durante todo o procedimento de pouso. Esta simplificação foi necessária

²⁷ Em todas as simulações, é calculada a distância total entre as aeronaves (distância longitudinal + distância lateral), que é então comparada a esta separação mínima entre aeronaves. Isso vale para todos os cenários simulados.

devido à ausência de estudos e informações detalhadas sobre os parâmetros de pouso utilizando o SOIA na literatura especializada da área.

- **Incerteza Modificada:** o cálculo do *Heading* é diferente do utilizado no cenário anterior (Tabela 8), com a inclusão da variável com a inclinação utilizada no SOIA para convergência entre aeronaves. Esta inclinação é adicionada ao *Heading* para refletir o efeito da trajetória do procedimento SOIA.
- **Inclusão de Variável:** a aeronave seguidora possui o *Heading* determinístico, utilizado para representar a convergência de trajetória entre aeronaves. Devido à falta de informações na literatura a respeito da inclinação adotada no SOIA, é utilizado um intervalo entre 0° e 60° para medir a sensibilidade do risco ao se variar a inclinação utilizada pelo SOIA na aeronave. Este intervalo foi utilizado devido aos resultados apresentados, pois para valores negativos de *Heading* a trajetória de pouso diverge, o que não faz sentido para esta análise e, para valores acima de 60°, há dois motivos: o primeiro é que não foram obtidos casos de colisão entre aeronaves para o número de simulações adotado e, portanto, foram suprimidos da tabela de resultados; e o segundo é que, para inclinações muito altas, a tendência é que a aeronave seguidora siga uma trajetória quase perpendicular ao da pista, não fazendo sentido.
- **Ajuste de Variável:** Foi adicionado um fator de correção para distância lateral, em relação ao cenário ILS/PRM, para que a convergência das aeronaves, no caso de uma trajetória ideal, não resultasse sempre em colisões, pelo fato de que a posição inicial lateral das aeronaves ser muito próxima. Este fator de correção, apresentação na θ , é um cálculo trigonométrico para que a distância inicial entre aeronaves considere a ocorrência da convergência das trajetórias das aeronaves. Outro ajuste necessário foi alterar esse incremento na distância inicial, pois o fator de correção como estava implicaria em grandes distâncias laterais iniciais, pois esse fator de correção é calculado sobre uma distância longitudinal grande, o que resulta em uma distância lateral inicial elevada, o que não era factível. Com o intuito de reduzir essa distância lateral inicial e também preservar o comportamento da curva de risco nos cenários simulados, foi utilizado um fator fixo de 1%, de forma a trazer a distância lateral inicial para intervalos mais próximos dos pousos convencionais. Este fator é conservador e pessimista, pois uma distância lateral inicial menor potencializa as chances de colisão entre aeronaves, portanto, no caso do valor do ajuste ser errôneo, este erra para o lado conservador.

$$\text{posicao_inicial_nave_By} = \text{dist\~ancia_pistas} + \text{velocidade_nave_A} * t * \sin(\text{heading}) * \text{fator}$$

(8)

Estas modificações e as demais parametrizações estão ilustradas na Tabela 10 e Tabela 11, junto com um comparativo em relação o cenário de Pouso Convencional + ILS/PRM, para servir de base de comparação qualitativa. As referências utilizadas para obtenção dos valores e distribuições estatísticas adotadas estão presentes na seção 5.4.

Tabela 10 - Parametrização das Incertezas

<u>Incerteza</u>	Pouso Convencional + ILS/PRM	Pouso SOIA + ILS/PRM
Posicionamento	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 11$ m	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 11$ m
Velocidade (Aeronave Seguidora)	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s
Heading	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10°	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10° + Heading (Variável)

Tabela 11 - Parametrização das Variáveis

<u>Variáveis</u>	Pouso Convencional + ILS/PRM	Pouso SOIA + ILS/PRM
Separação Mínima entre Aeronaves	150 m	150 m
Velocidade (Aeronave Líder)	72 m/s	72 m/s
Ponto Inicial Longitudinal	11.100 m da Pista	11.100 m da Pista
Ponto Inicial Lateral	Distância entre Pistas	Distância entre Pistas + (fator de correção)*(fator de ajuste)
Heading		Varia entre 0° a 60° , conforme simulação

6.4.3 Pousos Convencionais e SBAS

Neste cenário é realizado um comparativo entre o uso de procedimentos tradicionais de pousos paralelos (a Figura 7 ilustra a arquitetura do SBAS, com os principais componentes) e os pousos utilizando a técnica SBAS, reutilizando os parâmetros básicos de pouso do primeiro cenário. O SBAS possui uma precisão superior ao do ILS/PRM para as informações de posicionamento da aeronave e isso resulta em uma variância menor na incerteza de posicionamento da aeronave. O cenário SBAS não é abordado no trabalho de (OGATA, 2003), pois em seu trabalho o foco foi somente na área de pousos convencionais.

Quanto às mudanças na parametrização deste cenário em relação aos demais, basicamente ocorre a mudança dos valores da distribuição da incerteza do posicionamento da aeronave, permanecendo os mesmos valores e considerações para as demais incertezas, variáveis e hipóteses adotadas. A incerteza no posicionamento da aeronave é uma curva normal com média zero e variância de 7,6 metros, seguindo os critérios de especificação do WAAS (FAA, 2001).

Estas modificações e parametrizações estão ilustradas na Tabela 12 e Tabela 13, junto com um comparativo em relação o cenário de Pouso Convencional + ILS/PRM, para servir de base de comparação qualitativa. As referências utilizadas para obtenção dos valores e distribuições estatísticas adotadas estão presentes na seção 5.4.

Tabela 12 - Parametrização das Incertezas

<u>Incertezas</u>	Pouso Convencional + ILS/PRM	Pouso Convencional + SBAS
Posicionamento	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 11$ m	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 7,6$ m (FAA, 2001)
Velocidade (Aeronave Seguidora)	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s
Heading	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10°	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10°

Tabela 13 - Parametrização das Variáveis

<u>Variáveis</u>	Pouso Convencional + ILS/PRM	Pouso Convencional + SBAS
Separação Mínima entre Aeronaves	150 m	150 m
Velocidade (Aeronave Líder)	72 m/s	72 m/s
Ponto Inicial	11.100 m da Pista	11.100 m da Pista

6.4.4 Pousos Convencionais e ADS-B

Neste cenário é realizado um comparativo entre o uso de procedimentos tradicionais de pousos paralelos e os pousos utilizando a técnica ADS-B, reutilizando os parâmetros básicos de pouso do primeiro cenário. O ADS-B possui uma precisão superior ao do ILS/PRM e ao do SBAS para as informações de posicionamento da aeronave e isso resulta em uma variância menor na incerteza de posicionamento da aeronave. O cenário ADS-B não é abordado no trabalho de (OGATA, 2003), pois em seu trabalho o foco foi somente na área de pousos convencionais em pistas paralelas.

As mudanças na parametrização deste cenário são análogas ao caso do SBAS, em que ocorre a mudança nos valores da distribuição da incerteza do posicionamento da aeronave, permanecendo os mesmos valores e considerações para as demais incertezas, variáveis e hipóteses adotadas. A incerteza no posicionamento da aeronave é uma curva normal com média zero e variância de 6 metros, seguindo a precisão do ADS-B (POWELL, 2006).

Estas modificações e parametrizações estão ilustradas na Tabela 14 e Tabela 15, junto com um comparativo em relação o cenário de Pouso Convencional + ILS/PRM, para servir de base de comparação qualitativa. As referências utilizadas para obtenção dos valores e distribuições estatísticas adotadas estão presentes na seção 5.4.

Tabela 14 - Parametrização das Incertezas

<u>Incerteza</u>	Pouso Convencional + ILS/PRM	Pouso Convencional + ADS-B
Posicionamento	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 11$ m	Curva Normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 6,0$ m (POWELL, 2006)
Velocidade (Aeronave Seguidora)	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s	Curva Uniforme de 57 a 88 m/s
Heading	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10°	Curva Normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$ + Degrau de -40° a $+40^\circ$ em passos de 10°

Tabela 15 - Parametrização das Variáveis

<u>Variáveis</u>	Pouso Convencional + ILS/PRM	Pouso Convencional + ADS-B
Separação Mínima entre Aeronaves	150 m	150 m
Velocidade (Aeronave Líder)	72 m/s	72 m/s
Ponto Inicial	11.100 m da Pista	11.100 m da Pista

6.5 Considerações Finais deste Capítulo

Este capítulo apresentou o método de análise e os cenários de pouso a serem avaliados com base no modelo proposto do Capítulo 5. O método apresentado consiste resumidamente em especificar os cenários com o conjunto de procedimento e técnica CSPA a serem avaliadas, parametrizando estes cenários para a geração dos dados para análise dos resultados obtidos, realizada no capítulo a seguir. Dentre os cenários de pouso que são simulados, encontram-se o comparativo entre o modelo de (OGATA, 2003) e o modelo utilizado; Pousos SOIA e ILS/PRM; Pousos RNP e ILS/PRM; Pousos Convencionais e ADS-B; Pousos Convencionais e SBAS.

7 Análise dos Resultados

Este capítulo exhibe os resultados obtidos para cada um dos cenários de avaliação mencionados no capítulo anterior, realizando uma análise sobre estes resultados, discutindo também o impacto das incertezas no nível de risco medido pelo modelo estendido.

7.1 Introdução

Neste capítulo são exibidos os resultados obtidos para os cenários especificados no capítulo anterior, com a conseguinte análise e discussão sobre o impacto das parametrizações utilizadas no nível de risco calculado. Inicialmente é feito um comparativo entre o modelo estendido e o modelo de (OGATA, 2003), com o objetivo de verificar se há coerência nos resultados obtidos. Posteriormente são realizadas as análises para os cenários apresentados na seção 6.4.

Dentre algumas informações de cunho computacional, as simulações foram executadas inicialmente em um *laptop* com processador Core 2 Duo @ 1.66Ghz, com 2 GB de RAM e HD de 200 GB e posteriormente em um *desktop* Core i5 Quad @ 3.2 Ghz, com 4 GB de RAM e HD 500 GB. O modelo proposto necessita majoritariamente de capacidade de processamento, enquanto necessita de uma quantidade modesta de memória RAM e espaço no HD. A utilização de equipamento com capacidade distinta de processamento possui somente impacto no tempo de simulação, não comprometendo os aspectos qualitativos e quantitativos dos resultados gerados.

O tempo de execução das simulações do modelo depende fortemente de dois fatores:

- **Número de Simulações:** Este é o fator principal que delimita o tempo de execução das simulações, sendo que, em média, o tempo de 60 a 75 minutos é necessário para simular o modelo estendido com 100.000 simulações, em que cada simulação é equivalente a 1 pouso, utilizando apenas um dos núcleos do processador. No caso da utilização de vários processadores (núcleos), foi possível observar uma redução proporcional do tempo de simulação, devido à independência na análise de cada cenário de voo, permitindo um paralelismo natural do algoritmo utilizado.
- **Quantidade de Violações de Separação Mínima:** Este é um aspecto secundário, mas influi nos tempos de simulações no sentido de que simulações que apresentem violação da separação mínima entre aeronaves são imediatamente finalizadas, ou seja,

é incrementado o medidor de risco de colisão e parte-se para a próxima simulação. Quando um cenário analisado possui grandes probabilidades de colisão entre aeronaves, estas simulações tendem a ser mais rápidas do que em cenários com aproximações mais seguras entre aeronaves.

Nas próximas seções, são exibidos os resultados coletados a partir das simulações dos cenários especificados na seção 6.4, com a posterior análise e discussão dos resultados. Serão vistos os comparativos para os seguintes cenários:

- **Cenário 1:** Modelo de (OGATA, 2003) e Modelo Estendido;
- **Cenário 2:** Pousos Convecionais com ILS/PRM e Pousos SOIA com ILS/PRM;
- **Cenário 3:** Pousos Convecionais com ILS/PRM e Pousos RNP com ILS/PRM;
- **Cenário 4:** Pousos Convecionais com ILS/PRM e Pousos Convencionais com SBAS;
e
- **Cenário 5:** Pousos Convecionais com ILS/PRM e Pousos Convencionais com ADS-B.

7.2 Cenário 1: Modelo de (OGATA, 2003) e Modelo Estendido

No primeiro cenário, é realizado o comparativo entre o risco obtido pelo modelo de (OGATA, 2003) e pelo modelo estendido proposto, utilizando o mesmo número de simulações do trabalho de (OGATA, 2003). Na sequência, é aumentado o número de simulações para avaliação de sensibilidade dos resultados.

Neste cenário são esperados os seguintes resultados de simulação:

1. **Valores de risco para comparativo com o modelo de (OGATA, 2003)** Conforme apresentado na seção 6.4.1, especialmente para valores pequenos de espaçamento entre pistas, é esperado que o modelo estendido apresente valores próximos aos do modelo de (OGATA, 2003). Isto ocorre porque qualquer único evento de desvio de trajetória da aeronave seguida pode resultar em um conflito em ambos os modelos. A característica da curva de risco deve ser a mesma, ou seja, para um espaçamento de pistas infinito, o risco deve tender a zero assintoticamente.
2. **Valores de risco conforme aumento do número de simulações:** Foram realizados, inicialmente, testes para 1.000, 10.000 e 100.000 simulações. A partir dos resultados obtidos de diferentes números de simulações, com um mesmo espaçamento entre pistas, é possível avaliar, em função dos resultados, um valor satisfatório para a

quantidade de simulações que equilibre uma boa precisão e um esforço reduzido de processamento/computação.

Na Tabela 16, são exibidas as informações obtidas na simulação do modelo proposto para os valores de risco em diversos valores de espaçamento variando-se L , a distância entre pistas paralelas e diferentes números de simulações.

O intervalo de distâncias utilizado entre pistas é para conseguir realizar inicialmente um comparativo com o modelo de (OGATA, 2003) e também está dentro do intervalo de distância entre pistas de 750 pés a 4300 pés, que é utilizado na literatura como distanciamento para caracterizar um pouso paralelo como sendo CSPA.

Nos resultados obtidos da Tabela 16, podem-se interpretar os números da seguinte forma (por exemplo): para uma distância entre pistas de 1.500 pés e para um número de simulações igual a 100.000, a probabilidade de ocorrer um conflito para um procedimento de pouso em pistas paralelas é de $2,5500 \times 10^{-2} \%$ para o modelo estendido.

Primeiramente, nota-se que o número de simulações não resultou em significativas variações no valor de risco obtido (estas com média de aproximadamente 10% entre 1.000 e 100.000 simulações) e também não alterou a ordem de grandeza dos resultados obtidos. Como o tempo utilizado para as 100.000 simulações não é muito elevado e em termos de precisão nos resultados se apresenta como razoável, o valor de 100.000 simulações é utilizado para os comparativos dos cenários seguintes.

Em (OGATA, 2003), com o intuito de avaliar em maior precisão os níveis de risco para pousos paralelos convencionais, é feito também uma simulação com maior número de iterações, neste caso, com 500.000 simulações. O comparativo também se estendeu para este número de simulações, apresentados na Tabela 16. Nota-se que a variação entre os resultados obtidos para 100.000 simulações é bem próxima do obtido para 500.000 simulações (variação de menos de 5%, em média), o que reforça o uso do valor de 100.000 simulações, pois neste cenário, o esforço computacional foi multiplicado 5 vezes, em troca de um resultado com precisão melhor na ordem de 2 a 5%.

Tabela 16 - Comparativo entre Modelo (OGATA, 2003) e Modelo Proposto

L (pés) Espaçamento	Número de Simulações	Risco (%) Modelo Ogata	Risco (%) Modelo Proposto
700 (~213 m)	1.000	$4,7500 \times 10^{-1}$	$5,2800 \times 10^{-1}$
	10.000	$4,6660 \times 10^{-1}$	$5,1750 \times 10^{-1}$
	100.000	$4,7380 \times 10^{-1}$	$5,1910 \times 10^{-1}$
	500.000	$4,7268 \times 10^{-1}$	$5,1670 \times 10^{-1}$
800 (~244 m)	1.000	$3,1900 \times 10^{-1}$	$3,6100 \times 10^{-1}$
	10.000	$3,3390 \times 10^{-1}$	$3,8690 \times 10^{-1}$
	100.000	$3,3369 \times 10^{-1}$	$3,8300 \times 10^{-1}$
	500.000	$3,3519 \times 10^{-1}$	$3,7960 \times 10^{-1}$
900 (~274 m)	1.000	$2,0900 \times 10^{-1}$	$2,6300 \times 10^{-1}$
	10.000	$2,1650 \times 10^{-1}$	$2,7080 \times 10^{-1}$
	100.000	$2,1235 \times 10^{-1}$	$2,7320 \times 10^{-1}$
	500.000	$2,1185 \times 10^{-1}$	$2,7430 \times 10^{-1}$
1.000 (~305 m)	1.000	$1,2200 \times 10^{-1}$	$1,7300 \times 10^{-1}$
	10.000	$1,2240 \times 10^{-1}$	$1,8900 \times 10^{-1}$
	100.000	$1,1634 \times 10^{-1}$	$1,8810 \times 10^{-1}$
	500.000	$1,1421 \times 10^{-1}$	$1,9200 \times 10^{-1}$
1.100 (~335 m)	1.000	$5,1000 \times 10^{-2}$	$1,2300 \times 10^{-1}$
	10.000	$4,4700 \times 10^{-2}$	$1,3950 \times 10^{-1}$
	100.000	$5,0510 \times 10^{-2}$	$1,3310 \times 10^{-1}$
	500.000	$5,2058 \times 10^{-2}$	$1,3270 \times 10^{-1}$
1.200 (~366 m)	1.000	$1,7000 \times 10^{-2}$	$9,6000 \times 10^{-2}$
	10.000	$1,9300 \times 10^{-2}$	$9,0400 \times 10^{-2}$
	100.000	$1,8140 \times 10^{-2}$	$8,8400 \times 10^{-2}$
	500.000	$1,7888 \times 10^{-2}$	$8,9500 \times 10^{-2}$
1.300 (~396 m)	1.000	$6,0000 \times 10^{-3}$	$6,7000 \times 10^{-2}$
	10.000	$3,9000 \times 10^{-3}$	$5,8900 \times 10^{-2}$
	100.000	$3,9800 \times 10^{-3}$	$6,0900 \times 10^{-2}$
	500.000	$4,1600 \times 10^{-3}$	$6,0000 \times 10^{-2}$
1.400 (~427 m)	1.000	- (*)	$3,1000 \times 10^{-2}$
	10.000	$7,0000 \times 10^{-4}$	$4,3300 \times 10^{-2}$
	100.000	$4,4000 \times 10^{-4}$	$3,9600 \times 10^{-2}$
	500.000	$4,4200 \times 10^{-4}$	$3,9100 \times 10^{-2}$
1.500 (~457 m)	1.000	- (*)	$2,0000 \times 10^{-2}$
	10.000	- (*)	$2,6700 \times 10^{-2}$
	100.000	- (*)	$2,5500 \times 10^{-2}$
	500.000	$8,0000 \times 10^{-6}$	$2,5600 \times 10^{-2}$

(*) – Simulações em que não foram encontradas perdas de separação entre aeronaves.

Na Figura 27, é graficamente ilustrado o comparativo entre os modelos de (OGATA, 2003) e o Modelo Estendido, do qual se podem obter as seguintes conclusões quantitativas:

- Em todos os níveis de espaçamento entre pistas, o Modelo Proposto apresenta risco maior do que o modelo de (OGATA, 2003).
- O comportamento da variação nos valores de risco obtidos, em função do número de simulações realizadas, no Modelo Estendido é semelhante ao encontrado no modelo de (OGATA, 2003).
- A taxa de redução do risco, conforme se aumenta o espaçamento entre pistas, é mais acelerada no modelo de (OGATA, 2003) do que no Modelo Estendido.

Figura 27 - Gráfico Comparativo entre Modelo de (OGATA, 2003) e o Modelo Estendido

Quanto aos aspectos qualitativos dos resultados no comparativo da Figura 27, podem-se fazer as seguintes observações:

- O Modelo Estendido apresenta um risco maior do que o modelo de (OGATA, 2003), em grande parte devido ao “efeito memória”, ou seja, na ocorrência de um desvio de trajetória da aeronave, há uma possibilidade de que ocorra um segundo desvio de trajetória em algum momento seguinte, sendo ambos os desvios em sentido à outra aeronave (líder), o que aumenta os riscos de colisão. Esse “efeito memória” no Modelo Estendido foi acrescentado para permitir um aspecto dos cenários reais de pouso, em que há uma probabilidade da aeronave persistir no desvio da trajetória;
- O “efeito memória” do Modelo Estendido acrescenta uma hipótese mais realista sobre o comportamento da aeronave, ao mesmo tempo em que torna o modelo mais

conservador do que o modelo de (OGATA, 2003), o que é útil em termos de avaliação dos níveis de risco dos cenários;

- O comportamento da curva de risco *versus* espaçamento entre pistas, representado na Figura 27, é semelhante nos dois modelos, diminuindo rapidamente nos incrementos iniciais de espaçamento e depois lentamente se reduzindo nos espaçamentos maiores (conforme as expectativas apresentadas no início desta seção e na seção 6.4.1). Este formato de curva é importante que seja semelhante nos dois modelos, pois o comportamento da variação de risco deve ser semelhante nos dois casos de parametrizações.

Em termos de *Risco Total*, considerando-se respectivamente os valores de risco aceitável (variável $P(E)$ na Tabela 6) de $0,8 \cdot 10^{-2} \%$ para o modelo de (OGATA, 2003) e de $0,8 \cdot 10^{-1} \%$ para o modelo utilizado, verifica-se que a partir dos dados obtidos da Tabela 16, a distância mínima aceitável para ambos modelos é de pistas com espaçamento superior a 1.300 pés (396 metros), de forma a atender ao valor de *Risco Total* de $4 \cdot 10^{-8}$. Portanto, o uso do ajuste da variável $P(B)$, discutida na seção 6.3, resultou na mesma distância mínima aceitável e, portanto, o valor de $0,8 \cdot 10^{-1} \%$ para $P(E)$ é utilizado como valor base de risco aceitável para os demais cenários.

Para este cenário, assume-se que utilizando parametrizações semelhantes, o Modelo Estendido possui o mesmo comportamento, em termos de curva de risco, do modelo (OGATA, 2003). O risco diminui conforme se aumenta o espaçamento entre pistas, o que é o intuitivamente esperado, sendo que esta relação não é linear, pois a redução de risco é mais acentuada nos passos iniciais de aumento de espaçamento entre pistas do que nos passos finais das simulações.

Nos cenários posteriores, as parametrizações se alteram para atender aos requisitos específicos do respectivo conjunto de procedimento e técnica CSPA avaliada. No caso dos dados utilizados de pousos convencionais nos comparativos dos próximos itens, os dados utilizados são os mesmos dos coletados nesta seção.

7.3 Cenário 2: Pousos Convecionais com ILS/PRM e Pousos com SOIA e ILS/PRM

Neste cenário, é simulado o pouso utilizando SOIA com o ILS/PRM. Utilizando-se os parâmetros apresentados na Tabela 10 e Tabela 11, variam-se dois parâmetros para avaliação da sensibilidade do risco em relação à variação do *Heading* da aeronave e também da distância entre pistas.

Neste cenário são esperados os seguintes resultados de simulação:

1. **Número de simulações adotado:** foram realizadas 100.000 simulações para cada combinação dos parâmetros de *Heading* da aeronave e distância entre pistas. O número de 100.000 simulações foi escolhido com base nas análises realizadas no início do capítulo.
2. **Valores de risco em comparação com pousos convencionais com ILS/PRM:** é esperado que no uso do SOIA com o ILS/PRM, em comparação com distâncias de pistas iguais, o aumento do *Heading* da aeronave apresente valores de risco menores do que sem o *Heading*, para quaisquer valores de *Heading* estritamente maiores do que zero. Isto ocorre porque há uma maior distância inicial entre as aeronaves, resultante do ajuste realizado devido ao *Heading* da aeronave, distância esta que se reduz ao longo do procedimento de pouso e cujo valor final é o da distância adotada entre pistas. No caso do *Heading* igual a zero, o modelo se simplifica para o caso de pousos convencionais com ILS/PRM, ou seja, são esperados resultados semelhantes²⁸ para *Heading* nulo.

Na Tabela 17, são exibidos os dados coletados nas simulações do SOIA + ILS/PRM, variando-se tanto a distância entre pistas (entre 700 e 1.500 pés) quanto o *Heading* da aeronave (entre 0° e 60°). Para melhor exibição desses dados, a Figura 28 apresenta graficamente os resultados.

²⁸ Os resultados são semelhantes devido à obtenção dos valores a partir das distribuições de probabilidade, ou seja, é natural que ocorram ligeiras variações no comparativo devido às amostras serem diferentes.

Tabela 17 - Número de Conflitos no Cenário SOIA+ILS/PRM para 100.000 Simulações

	700 pés	800 pés	900 pés	1.000 pés	1.100 pés	1.200 pés	1.300 pés	1.400 pés	1.500 pés
0°	51989	37947	27083	18673	12641	8273	5363	3332	2079
1°	38279	26492	18152	11865	7762	4800	2982	1819	1102
2°	26454	17498	11316	7117	4342	2619	1571	937	541
3°	17238	10695	6670	3920	2350	1374	807	449	262
4°	10385	6117	3628	2063	1174	670	372	208	109
5°	5808	3268	1828	997	572	297	160	91	45
6°	3063	1639	874	462	247	117	69	36	16
7°	1489	753	381	195	102	55	25	10	6
8°	655	313	150	81	45	17	9	5	2
9°	261	124	68	32	14	7	3	2	- (*)
10°	109	52	24	9	6	3	- (*)	- (*)	- (*)
11°	44	19	7	4	1	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)
12°	11	4	3	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)
13°	3	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)
14°	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)
15°	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)
30°	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)
45°	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)
60°	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)	- (*)

(*) Cenários em que não foram encontradas perdas de separação entre aeronaves para 100.000 simulações.

Na Figura 28, é graficamente ilustrado o número de conflitos no cenário SOIA + ILS/PRM, variando-se a distância entre pistas e o *Heading* utilizado, da qual se podem obter as seguintes conclusões quantitativas:

- O número de conflitos se reduz, para um mesmo *Heading*, conforme se aumenta o distanciamento entre pistas, de acordo com o esperado;
- O número de conflitos se reduz, para uma mesma distância entre pistas, conforme se aumenta o *Heading* da aeronave, de acordo com o esperado;
- As maiores reduções de risco ocorrem conciliando-se com aumentos tanto no *Heading* da aeronave como no distanciamento entre pistas; e
- No caso de *Heading* nulo, a curva de números de conflitos apresenta comportamento análogo ao encontrado no caso de Pousos Convencionais + ILS/PRM, de acordo com o esperado.

Figura 28 - Gráfico com os Resultados da Simulação SOIA + ILS/PRM

Para ilustrar melhor, em um exemplo mais específico, o comportamento da redução do risco de pousos SOIA em comparação com o de pousos convencionais, na Figura 29 segue os resultados obtidos para distância entre pistas paralelas de 700 pés (para as demais distâncias entre pistas, é visto o mesmo comportamento das curvas), utilizando-se os dados da Tabela 16 e Tabela 17.

Primeiramente, observa-se que no caso de *Heading* nulo, o risco obtido do pouso SOIA se reduz ao do pouso convencional, conforme esperado. Entretanto, conforme o *Heading* da

aeronave aumenta, o risco do pouso SOIA se reduz rapidamente em relação ao pouso convencional, devido ao fato de que o pouso convencional não utilizar inclinações sendo, portanto, insensível ao risco (o número de conflitos para o pouso convencional foi fixado ao longo das inclinações, para ilustrar melhor a diferença).

Figura 29 - Comparativo entre Pousos SOIA e Convencionais para 700 pés

Em relação ao Risco Total, utilizando-se o valor de $0,8 \cdot 10^{-1} \%$ (Tabela 6) para atender a probabilidade de colisão de $4 \cdot 10^{-8}$ (Tabela 6), na Tabela 18 é apresentado o nível de *Heading* mínimo aceitável da aeronave seguidora em relação ao eixo da aeronave líder, conforme se varia a distância entre pistas, de forma a atender o nível de risco estabelecido.

Tabela 18 - *Heading* Mínimo Aceitável Conforme Distância Entre Pistas

L	700 pés	800 pés	900 pés	1.000 pés	1.100 pés	1.200 pés	1.300 pés	1.400 pés	1.500 pés
<i>Heading</i> Mínimo Aceitável (em graus)	5°	4°	3°	2°	1°	1°	0°	0°	0°

O *Heading* aceitável encontrado é pequeno, pois em se tratando de uma distância longitudinal inicial em relação à pista de aproximadamente 11km (Tabela 11), pequenas inclinações sobre esta distância longitudinal resultam em distâncias laterais iniciais elevadas, o que reduz sensivelmente o risco nos passos iniciais do pouso, ou seja, ocorrem poucos conflitos durante as etapas iniciais de pouso.

Para este cenário, conclui-se que ao se variar o *Heading* utilizado pela aeronave durante o procedimento de pouso, o pouso SOIA apresenta um número de conflitos sensivelmente menor do que o encontrado no caso dos pousos convencionais. Ao se balancear um aumento tanto do *Heading* como da distância entre pistas, é possível obter uma forte redução no número de conflitos e, portanto, do risco. A combinação de distância entre pistas paralelas e o *Heading* da aeronave seguidora aceitáveis ocorre para inclinações pequenas, devido ao maior distanciamento horizontal inicial entre as aeronaves, o que reduz a chance de conflitos nos momentos iniciais do procedimento de pouso, em comparação com os pousos convencionais.

Os resultados encontrados para o pouso SOIA são complementares aos encontrados por (FRAGA, 2009), sendo quem que seu trabalho de pesquisa teve foco na medição, em termos de capacidade e *delay*, de pousos em pistas paralelas no Aeroporto de Guarulhos. Dentre os resultados obtidos por (FRAGA, 2009), constam uma redução na ordem de 45% nos *delays* para pousos e um aumento de capacidade de pouso de 18%. O uso de pousos SOIA com ILS/PRM, portanto, representa uma forma de aumentar tanto a capacidade de um aeroporto, como também mantém o risco em níveis aceitáveis.

Há o cenário em que o *Heading* utilizado é em uma região localizada durante o procedimento do pouso, incluindo-se uma angulação variável, que é o caso dos pousos RNP, discutido na seção a seguir.

7.4 Cenário 3: Pousos Convencionais com ILS/PRM e Pousos com RNP e ILS/PRM

Os pousos com RNP seguem uma trajetória semelhante à apresentada na Figura 17 e, conforme discutido anteriormente, devido à ausência de maiores informações detalhadas na literatura, somente é realizada uma breve discussão dos possíveis resultados que poderiam ser encontrados no caso da possibilidade de se simular este cenário.

O RNP apresenta uma analogia com o SOIA, no aspecto de utilizar uma variação no *Heading* durante a trajetória de pouso e diferindo no fato de que ao contrário do SOIA, o RNP realiza a variação no *Heading* em momentos específicos do pouso, *Heading* este variável e concentrando as maiores variações de *Heading* no momento inicial e final de convergência.

Este cenário poderia apresentar um nível de risco intermediário entre o cenário de pousos convencionais e o de pousos SOIA. Porém, devido à variação de *Heading* ser significativa no momento inicial e final da convergência, ao ocorrer uma grande variação no posicionamento momentâneo da aeronave, o risco de conflito possivelmente pode se potencializar,

necessitando realmente de uma simulação para modelar especificamente estas duas etapas para maiores conclusões sobre o comportamento do RNP.

7.5 Cenários 4 e 5: Pousos Convencionais com ILS/PRM e Pousos Convencionais com SBAS / ADS-B

Neste cenário, são simulados pousos convencionais utilizando o SBAS e depois com o ADS-B, utilizando-se os parâmetros apresentados na Tabela 12 e Tabela 13 para o SBAS, Tabela 14 e Tabela 15 para o ADS-B, variando-se a distância entre pistas para avaliação da sensibilidade do risco em relação à variação da precisão no posicionamento da aeronave e da distância entre pistas.

A diferenciação do cenário SBAS em relação ao ADS-B ocorre na precisão obtida do posicionamento da aeronave, com o objetivo de medir a variação de risco conforme se utiliza técnicas que possuem maior precisão na localização das aeronaves.

Neste cenário são esperados os seguintes resultados de simulação:

1. **Número de simulações adotado:** Foram realizadas 100.000 simulações para cada distância entre pistas. O número de 100.000 simulações foi escolhido com base nas análises realizadas na seção 6.4.1.
2. **Valores de risco obtidos:** É esperado que, para uma mesma distância entre pistas e procedimento de pouso, o risco seja menor nas técnicas que possuem maior precisão no posicionamento da aeronave.
3. **Comportamento do risco conforme variação da distância entre pistas:** É esperado que a variação no risco para o ADS-B e para o SBAS siga um comportamento semelhante conforme se aumenta a distância entre pistas, em que as diferenças se situam apenas no valor do risco e não na sua variação.

Na Tabela 19, são exibidos os dados coletados nas simulações do SBAS e do ADS-B, variando-se a distância entre pistas e utilizando os parâmetros de precisão da respectiva técnica CSPA. Esta tabela possui também os números para o ILS/PRM, apresentados de forma a permitir um comparativo. Para melhor exibição desses dados, a Figura 30 apresenta graficamente os resultados.

Tabela 19 - Número de Conflitos no ILS/PRM, SBAS e ADS-B em 100.000 Simulações

L (pés) Espaçamento	Pousos Convencionais com ILS/PRM	Pousos Convencionais com SBAS	Pousos Convencionais com ADS-B
700	51910	51014	50729
800	38300	36776	36405
900	27320	25955	25533
1.000	18810	17603	17180
1.100	13310	11715	11392
1.200	8840	7548	7267
1.300	6090	4802	4607
1.400	3960	2932	2790
1.500	2550	1786	1676

Na Figura 30, é graficamente ilustrado o número de conflitos para as técnicas ILS/PRM, SBAS e ADS-B (todas essas utilizando pousos convencionais), variando-se a distância entre pistas, da qual se podem obter as seguintes conclusões quantitativas:

- Relembrando que em termos de precisão no posicionamento da aeronave, o ILS/PRM possui baixa precisão, o SBAS possui precisão média e o ADS-B possui precisão alta, o aumento da precisão no posicionamento das aeronaves reduz o número de conflitos para todas as distâncias entre pistas; porém, este efeito é marginal conforme se observa que as curvas quase que se sobrepõem;
- A redução do número de conflitos do ILS/PRM para o SBAS, em todas as distâncias entre pistas, é maior que do SBAS para o ADS-B. Isto ocorre em virtude da redução da imprecisão do ILS/PRM (11 m) para o SBAS (7,6 m) ser superior ao do SBAS (7,6 m) para o ADS-B (6 m); e
- As maiores reduções no número de conflitos se encontram nas simulações com distâncias entre pistas reduzidas, em virtude da imprecisão da posição da aeronave impactar proporcionalmente mais pela menor margem de possibilidade de evitar a violação da distância mínima, comparado ao distanciamento maior entre pistas.

Figura 30 - Comparativo entre ILS/PRM, SBAS e ADS-B

Em relação ao *Risco Total*, utilizando-se o valor de $0,8 \cdot 10^{-1} \%$ (Tabela 6) para atender a probabilidade de colisão de $4 \cdot 10^{-8}$ (Tabela 6), há uma pequena redução na distância mínima entre pistas aceitável no uso do SBAS e do ADS-B, com distância mínima de 1.200 pés para ambas técnicas, em relação ao ILS/PRM (1.300 pés). Isso comprova, por outro meio, o ganho marginal em termos de redução de risco na utilização de técnicas de maior precisão no posicionamento da aeronave.

Para este cenário, conclui-se que ao aumentar a precisão da posição das aeronaves, obtém-se uma redução marginal no nível de risco, com o ADS-B apresentando os melhores resultados. A variação é mais significativa nas simulações com pequenas distâncias entre pistas, pois a imprecisão do posicionamento possui maior impacto pela pequena margem para violação da distância mínima.

7.6 Avaliação das Análises das Simulações

Após apresentar as análises dos cenários simulados, segue uma breve conclusão sobre os impactos dos resultados obtidos para os procedimentos e técnicas avaliadas. A escolha do conjunto de procedimento e técnica CSPA utilizada se pauta não apenas pelo risco encontrado durante o pouso, mas no conjunto de aspectos de segurança envolvidos durante todo o voo.

Em termos apenas de risco para pousos, a redução no risco encontrada no cenário de pousos SOIA + ILS/PRM foi a mais significativa, em consequência do *Heading* da aeronave contribuir no aumento da distância entre aeronaves durante parte do procedimento. O uso do

SOIA possibilita o reuso do ILS, comumente encontrado em aeroportos de médio/grande porte, tornando-se uma solução econômica e relativamente rápida para implantação.

O uso de pousos convencionais com o SBAS e o ADS-B apresentou variações marginais na redução de risco, devido ao efeito da maior precisão impactar pouco no risco do pouso. Entretanto, deve-se notar que isso não invalida as implantações atuais de ambas as técnicas, pois os benefícios não se encontram somente na fase de pouso de aeronaves, como também durante a navegação e para o controle de tráfego aéreo, permitindo um aumento da capacidade da malha aérea. A conclusão para estas técnicas é que o benefício obtido em termos de redução de risco para pouso é marginal, mas não invalida os ganhos nas demais fases de voo.

7.7 Considerações Finais deste Capítulo

Este capítulo apresentou a análise dos dados obtidos nas simulações dos cenários apresentados no capítulo anterior, com os resultados esperados, uma descrição quantitativa dos resultados, tanto numericamente quanto ilustrativamente. Comparativos foram realizados entre os cenários, possibilitando comparar o comportamento do risco conforme se varia o procedimento de pouso ou a técnica CSPA utilizada. Finalizando a análise de cada cenário, é apresentado o nível aceitável de segurança.

8 Considerações Finais

Este capítulo apresenta os resultados deste trabalho de pesquisa, mencionando as principais conclusões obtidas na análise do modelo proposto e dos cenários comparativos utilizados para avaliar o conjunto de procedimento e técnica CSPA. Por fim, são enunciados possíveis trabalhos futuros e considerações finais que podem ampliar e melhorar as avaliações de risco para pousos CSPA.

Esse trabalho de pesquisa apresenta uma avaliação de risco para pousos em pistas paralelas, considerando o conceito CSPA. Esta proposta é embasada na necessidade de se obter avaliações do nível de risco para alguns conjuntos de procedimento e técnica CSPA, que são utilizadas para atender à crescente demanda nos sistemas de tráfego aéreo, especialmente devido ao aumento no número de usuários e voos. Esta demanda pode ser acomodada por meio do uso de conceitos de pousos em pistas paralelas, o que pode aumentar significativamente a capacidade dos aeroportos, sem necessitar de enormes investimentos ou grandes modificações na infraestrutura aeroportuária.

Para realizar um comparativo inicial, é especificado um cenário de verificação dos resultados com os obtidos no modelo de (OGATA, 2003), que foi utilizado como base para a construção do modelo estendido utilizado neste trabalho, de forma a analisar a coerência do risco avaliado durante as simulações. A partir da verificação, foram especificados cenários a partir de conjuntos de procedimento e técnica CSPA, para medir o impacto no risco de pouso ao se variar a trajetória e a precisão do posicionamento da aeronave.

8.1 Principais Contribuições

Dentre as principais contribuições deste trabalho de pesquisa, encontram-se:

- O comparativo entre combinações de procedimento e técnicas CSPA, ampliando o escopo de análise do trabalho de (OGATA, 2003). Este comparativo permite não apenas medir simplesmente o risco de um cenário, mas avaliar qual o impacto da variação nos parâmetros e também quais os cenários mais adequados para permitir o uso de pousos em pistas paralelas, sem violar as normas de segurança;
- A inclusão do “efeito memória”, de forma com que possa ocorrer o acúmulo de desvios de trajetória ao longo de um procedimento de pouso em pistas paralelas, acrescenta uma situação mais conservadora e, ao mesmo tempo mais realista para as simulações utilizadas neste trabalho;

- A obtenção dos dados e a avaliação dos ajustes necessários para a simulação do procedimento SOIA e para as técnicas SBAS e ADS-B em conjunto com o comparativo com o cenário de pousos convencionais com ILS/PRM, permitiu a avaliação do grau de coerência dos principais resultados obtidos;
- O levantamento das categorias de modelos de análise de risco desenvolvidas nos últimos anos, com base na técnica de simulação utilizada, possibilitou posicionar o modelo estendido dentre os modelos do estado da arte; e
- Criação de um mapeamento entre os fatores de risco associados à etapa de pouso e às variáveis essenciais das quais podem se derivar métricas de risco. Este mapeamento provou-se essencial para constatar a flexibilidade do modelo utilizado, ao permitir a avaliação de outros cenários a partir de modificações apenas nas incertezas e condições iniciais do modelo.

8.2 Principais Resultados Obtidos

Dentre os principais resultados obtidos, encontram-se:

- O mapeamento entre fatores de risco e as variáveis de modelo possibilita concluir que o modelo de (OGATA, 2003) pode ser adaptado para simular outros cenários de voo, modificando-se o procedimento de pouso e a técnica CSPA utilizada, o que lhe confere flexibilidade;
- No comparativo entre o modelo utilizado e o modelo de (OGATA, 2003), observa-se que a inclusão do “efeito memória” no modelo possibilita avaliar os cenários de forma mais conservadora e realista;
- Na avaliação de pousos SOIA com o ILS/PRM, observou-se que tanto a variação do *Heading* da aeronave quanto a distância entre pistas contribuem para a redução do nível de risco encontrado, sendo que a condição ótima está no balanceamento entre um maior *Heading* e um maior distanciamento entre pistas;
- Na avaliação de pousos SOIA com o ILS/PRM, foi obtido o grau de inclinação mínimo necessário para realizar pousos com segurança para diversas distâncias entre pistas; e
- No cenário comparativo entre pousos convencionais, um utilizando o SBAS e outro o ADS-B, constatou-se que um aumento gradual da precisão do posicionamento na

aeronave resultou em uma redução marginal no nível de risco mesmo comparando-se com o ILS/PRM, sendo que as maiores reduções se encontraram em pequenas distâncias entre pistas paralelas, em que o impacto da imprecisão da aeronave é maior.

8.3 Propostas de Trabalhos Futuros

Este trabalho de pesquisa apresenta como possíveis linhas de pesquisa futuras, aspectos não analisados ou não explorados nesta pesquisa e possíveis extensões do modelo para expandir e aperfeiçoar o que foi desenvolvido no modelo estendido. Seguem os principais temas identificados durante esta pesquisa:

- Dentre os principais aspectos não modelados neste trabalho, está a interação humana entre os Pilotos e Controladores de Voo, pois estes aspectos envolvem o comportamento humano e sua dinâmica na utilização de mecanismos tecnológicos. Uma possibilidade interessante de pesquisa é o mapeamento dos comportamentos humanos em um formalismo em que seja possível a simulação por modelos de segurança, com o intuito de quantificar o risco que seja inerente à parte humana do processo ou mesmo da qualidade na tomada de decisão;
- Outra linha de pesquisa importante é o da modelagem do efeito de vórtices, considerando-se a sua formação e propagação, sendo considerado um problema de difícil simulação e validação, devido à variação significativa dos resultados quando se mudam ligeiramente as condições atmosféricas. O desenvolvimento de modelos de vórtices possui alguns resultados gerais que permitem obter um teto de valores de turbulência, mas faltam explicações a respeito do comportamento dos vórtices e a razão da grande sensibilidade dos resultados às pequenas variações, tais como da poluição, umidade, composição da atmosfera e direção dos ventos. Esta linha de pesquisa possui forte correlação multidisciplinar com os estudos realizados na área de meteorologia, aerodinâmica e de física;
- O uso de máquinas de estados específicas ou de formalismos análogos para definir modos de falha para cada uma das técnicas CSPA é uma extensão que enriqueceria a análise de risco, no sentido em que se tornaria possível incluir, por exemplo, taxas de falhas de componentes individuais encontrados em uma determinada técnica CSPA, e analisar como é a interação entre os componentes e o impacto no nível de risco do procedimento de pousos em pistas paralelas.

- A integração deste modelo estendido com as plataformas de teste de voo, tais como o desenvolvido no projeto PiPE/SEC (Plataforma Integrada para Ensaio de Sistemas Embarcados Críticos) (GIL, et al., 2009) possibilitaria tanto a simulação de pousos em pistas paralelas, utilizando parâmetros obtidos em condições reais de pouso, como a análise do impacto na modificação dos parâmetros de pouso em pistas paralelas no nível de risco considerado; e
- A simulação dos cenários não avaliados neste trabalho, tais como os conjuntos
 - SOIA + SBAS;
 - SOIA + ADS-B;
 - RNP + ILS/PRM;
 - RNP + SBAS; e
 - RNP + ADS-B.

8.4 Conclusões

O foco deste trabalho de pesquisa foi apresentar uma avaliação de risco de um conjunto de procedimento e técnica CSPA para analisar o impacto da variação de trajetória das aeronaves, da precisão no posicionamento das aeronaves e também da distância entre pistas paralelas.

A partir dos resultados obtidos, é possível avaliar quais opções de procedimento e técnica CSPA são adequadas para cada finalidade. O uso de procedimento SOIA e ILS/PRM foi o que apresentou a maior redução de risco, quando comparado ao procedimento convencional com ILS/PRM, conforme se aumenta a distância lateral entre as pistas. O uso do SOIA possibilita o reuso do ILS, comumente encontrado em aeroportos de médio e grande porte, tornando a combinação SOIA e ILS/PRM recomendada para os casos de implantação de pistas paralelas, mantendo-se ou mesmo reduzindo-se o nível de risco associado ao procedimento de pouso.

Em consequência da redução marginal encontrada no nível de risco para procedimentos de pouso em pistas paralelas, as técnicas SBAS e ADS-B devem ser analisadas sob a ótica de que ambas as técnicas são utilizadas durante todo o procedimento de voo e possuem benefícios na parte de otimização do tráfego aéreo e de seu controle. Portanto, o fato de não serem recomendadas para redução no nível de risco para pousos em pistas paralelas, pois os ganhos obtidos são pequenos em relação ao SOIA com ILS/PRM, isto não invalida os potenciais ganhos de eficiência encontrados nas demais fases de voo.

O estudo da possibilidade de construir modelos flexíveis permite melhorar futuramente as simulações ao se utilizar dados, cenários e condições reais de pouso, realizando apenas ajustes nas parametrizações do modelo estendido, de forma a refinar e melhorar os resultados obtidos. A necessidade de se avaliar os riscos para o tráfego aéreo de forma geral é essencial para atender à demanda futura prevista e, também, para manter ou melhorar os níveis de segurança praticados. Portanto, há muito a ser explorado ainda nessa área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRADOS, C.; GIRARD, I.; GENDNER, J.; JANEAU, G. **Global Positioning System (GPS) Location Accuracy Improvement Due to Selective Availability Removal**. Comptes Rendus Biologies, Vol. 325, No. 2, February 2002.
- ANAC. **Histórico**. Sítio da ANAC na Internet, acessado em março/2010. <http://www.anac.gov.br/anac/historicoAnac.asp>
- ANDREWS, J.W. **Radar-Based Analysis of the Efficiency of Runway Use**. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2001.
- ATC MUSEUM. **Precision Runway Monitor**. Sítio do ATC Museum na Internet, acessado em março/2010. http://www.atcmuseum.org/Surveillance/radar_cooperative/radar_cooperative_prm.asp.
- BARHYDT, R.; WARREN, A. W. **Development of Intent Information Changes to Revised Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (RTCA/DO-242A)**. NASA Technical Publication, May 2002.
- CAMARGO, J. B. **Requisitos de Sistemas Computacionais**. Apostila de Disciplina. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Janeiro 2007.
- CARPENTER, B. D.; KUCHAR, J. K. **Probability-Based Collision Alerting Logic for Closely-Spaced Parallel Approach**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. AIAA Press, 1997.
- CHUJO, A. M.; WALTER, F. **Potenciais Aplicações Estratégicas do Sistema CNS/ATM**. XI ENCITA, Outubro 2005.
- COX, S.; TAIT, R. **Safety, Reliability and Risk Management: An Integrated Approach**. Butterworth-Heinemann, 1998.
- DECEA. **Quem Somos**. Sítio do DECEA na Internet, acessado em março/2010. <http://www.decea.gov.br/o-decea/quem-somos/>
- DONOHUE, G.; SHORTLE, J.; XIE, Y. **Airport Terminal-Approach Safety and Capacity Analysis Using an Agent-Based Model**. Winter Simulation Conference, 2004.
- ELLIOTT, D. M.; PERRY, R. B. **NASA Research for Instrument Approaches to Closely Spaced Parallel Runways**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. AIAA Press, 2000.

EUROCONTROL. **European Flight Numbers Slump by 7% in November 2008**. Press Release, December 2008.

EUROCONTROL. **Flight Movements 2006-2025**. Eurocontrol Long-Term Forecast, 2006.

EUROCONTROL. **Flight Movements 2010-2016**. Eurocontrol Medium-Term Forecast, 2010.

FAA. **Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Fact Sheet**. U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, June 2007a.

FAA. **Historical Chronology, 1926-1996**. Documento disponibilizado no sítio da FAA na Internet, acessado em março/2010. <http://www.faa.gov/about/history/>. January, 2007b.

FAA. **Notice N 8200.97 Airman and Aircraft Approval for Reduced Visibility Flight Operations, including Category II/III Operations**. U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 2006.

FAA. **Order 8200.39D Flight Inspection of Precision Runway Monitors / Final Monitor Aid**. U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 2009.

FAA. **Order 8400.12A Required Navigation Performance 10 (RNP-10) Operational Approval**. U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 1998.

FAA. **Order JO 7110.65T Air Traffic Control**. U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 2010a.

FAA. **Specification for the Wide Area Augmentation System (WAAS)**. U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 2001.

FAA. **Update to Historical Chronology, 1997-2009**. Documento disponibilizado no sítio da FAA na Internet, acessado em março/2010. <http://www.faa.gov/about/history/>. February, 2010b.

FRAGA, R. **Analysis of Criteria for Closely-Spaced Parallel Runway Approaches Applied to a Multiple Airport System**. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Departamento de Infra-Estrutura Aeronáutica, 2009.

GIL, F.; CAMARGO, J. B.; ALMEIDA, J. R.; VISMARI, L. F.; CUGNASCA, P. S.; GIMENES, R. A.; FURTADO, V. H. **PIPE-SEC: Platform for Testing and Validation of the Operation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Controlled**

Airspace. VIII Simpósio de Tráfego Aéreo / II RIDITA, Novembro, 2009.

HINTON, D. A.; CHARNOCK, J. K.; BAGWELL, D. R. **Design of an Aircraft Vortex Spacing System for Airport Capacity Improvement.** 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, January 2000.

HOEKSTRA, J. M.; GENT, R. N. H. W.; RUIGROK, R. C. J. **Conceptual Design of Free Flight with Airborne Separation Assurance.** NLR Technical Paper 98252, June 1998.

HOLZAPFEL, F. **Probabilistic Two-Phase Wake Vortex Decay and Transport Model.** Journal of Aircraft, Vol. 40, No. 2, March-April 2003.

HOUCK, S; POWELL, J. D. **A Parametric Sensivity Study of Ultra Closely Spaced Parallel Approaches.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. AIAA Press, 2000.

HOUCK, S; POWELL, J. D. **Assessment of the Probability of a Midair Collision During an Ultra Closely Spaced Parallel Approach.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. AIAA Press, 2001.

ICAO. **Doc. 9750 - Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems.** Internacional Civil Aviation Organization, 2000.

ICAO. **Doc 9916 – Annual Report of the Council.** International Civil Aviation Organization, 2008.

INFRAERO. **Estatísticas de Aeroportos.** Sítio da INFRAERO na Internet, acessado em março/2010. <http://www.infraero.gov.br/movi.php?gi=movi>

IPEA. **Panorama e Perspectivas para o Transporte Aéreo no Brasil e no Mundo.** Comunicados do IPEA – Série Eixos do Desenvolvimento Brasileiro, Maio 2010.

JOHNSON, B. W. **Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems.** Addison-Wesley, 1989.

KING, B. T.; KUCHAR, J. K. **Evaluation of Collision Alerting System Requirements for Paired Approach.** 19th Digital Avionics Systems Conference, Philadelphia, PA, October 2000.

KOREN, I; KRISHNA, C. M. **Fault-Tolerant Systems.** Morgan Kaufmann Publishers, 2007.

KROZEL, J.; PETERS, M. E.; HUNTER, G. **Conflict Detection and Resolution for Future Air Transportation Management.** NASA Technical Report (TR 97138-01), Ames Research Center, Moffett Field, CA, USA, 1997.

- KUCHAR, J. K.; YANG, L. C. **A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods**. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 1, No. 4, December 2000.
- MAGYARITS, S; KOPARDEKAR, P.; SACCO, N.; CARMEN, K. **Simultaneous Offset Instrument Approaches at Newark International Airport: An Airspace Feasibility Study**. FAA Technical Report (DOT/FAA/CT-TN02/01), U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 2001.
- MATSUYAMA, R. T.; CUGNASCA, P. S. **Análise Comparativa de Técnicas de Pouso em Pistas Paralelas e suas Aplicações para o Cenário Brasileiro**. VII Simpósio de Tráfego Aéreo, Novembro, 2008.
- MATSUYAMA, R. T.; CUGNASCA, P. S. **Proposta de um Modelo de Avaliação de Segurança para Pousos em Pistas Paralelas**. VIII Simpósio de Tráfego Aéreo / II RIDITA, Novembro, 2009.
- MATSUYAMA, R. T.; CUGNASCA, P. S. **Identificação de Variáveis Críticas para Avaliação de Segurança em Procedimentos de Pouso em Pistas Paralelas**. IX Simpósio de Tráfego Aéreo, Novembro, 2010.
- MCKINSEY. **Estudo do Setor de Transporte Aéreo do Brasil**, Janeiro 2010
- MENON, P. K.; SWERIDUK, G. D.; SRIDHAR, B. **Optimal Strategies for Free Flight Air Traffic Conflict Resolution**. Optimal Synthesis, 1997.
- METROPOLIS, N. **The Beginning of the Monte Carlo Method**. Los Alamos Science, Special Issue, 1987.
- MOSER, R. F. **Procedimento PRM/SOIA**. Secretaria de Aviação Civil, 2007.
- NAVCEN. **Federal Radionavigation Plan**. Navigation Center, 2001.
- NAVERUS. **RNP**. Sítio do NAVERUS na Internet, acessado em abril/2010. <http://www.naverus.com/Learn/RNP.htm>
- NEWMAN, L; HENEGAR, M.; DUNHAM, R. **Managing Operational Risk in Next Gen**. ALPA Air Safety & Security Forum, 2007.
- OGATA, P. H. **Avaliação do Perigo de Colisão entre Aeronaves em Operação de Aproximação em Pistas de Aterrissagem Paralelas**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, 2003.

- OLIVEIRA, I. R. **Análise de Risco da Operação de Espaçamento Temporal Aerotransportado por Meio de um Modelo em Rede de Petri Estocástica e Dinamicamente Colorida.** Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, 2007.
- PERRY, R. B.; HINTON, D. A.; STUEVER, R. A. **NASA Wake Vortex Research for Aircraft Spacing.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. AIAA Press, 2000.
- PHAM, H. **Handbook of Reliability Engineering.** Springer, 2003.
- POWELL, J. D. **Use of Synthetic Vision to Enhance Airport Capacity.** Palo Alto Colloquia, October, 2006.
- REDDY, P.; MILLER, M. E. **Short Range Surveillance Link for Close Proximity Navigation during Closely Spaced Parallel.** ICNS Conference, May 2005.
- REYNOLDS, T. G.; HANSMAN, R. J. **Analysis of Separation Minima using a Surveillance State Vector Approach.** 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, June 2000.
- ROSSOW, V. J. **Classical Wing Theory and the Downward Velocity of Vortex Wakes.** Journal of Aircraft, Vol. 43, No. 2, March-April 2006a.
- ROSSOW, V. J. **Vortex-Free Flight Corridors for Aircraft Executing Compressed Landing Operations.** Journal of Aircraft, Vol. 43, No. 5, September-October 2006b.
- SAMANANT, P.; JACKSON, M. **Description of the AILS Alerting Algorithm.** NASA Technical Publication, May 2000.
- SHEPHERD, R.; CASSELL, R.; THAPA, R.; LEE, D. **A Reduced Aircraft Separation Risk Assessment Model.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- SHORTLE, J. F.; XIE, Y.; CHEN, C. H.; DONOHUE, G. L. **Simulating Collision Probabilities of Landing Airplanes at Nontowered Airports.** Society for Modeling and Simulation International, 2004.
- SHORTLE, J. F.; JEDDI, B. G.; SHERRY, L. **Statistics of the Approach Process at Detroit Metropolitan Wayne County Airport.** 2nd International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT), 2006.
- SMITH, D. J. **Reliability, Maintainability and Risk.** Reed Elsevier, Plc. 2001.
- SPENCE, G. T.; MOIGNE, A. L.; ALLERTON, D. J.; QIN, N. **Wake Vortex Model for**

Real-Time Flight Simulation Based on Large Eddy Simulation. Journal of Aircraft, Vol. 44, No. 2, March-April 2007.

TEO, R.; JANG, J. S.; TOMLIN, C. J. **Flight Demonstration of Provably Safe Closely Spaced Parallel Approaches.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. AIAA Press, 2005.

VESELY, W. E.; ROBERTS, N. H. **Fault Tree Handbook.** Government Printing Office, 1987.

VISMARI, L. F. **Vigilância Dependente Automática no Controle de Tráfego Aéreo: Avaliação de Risco Baseada em Modelagem em Redes de Petri Fluídas e Estocásticas.** Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, 2007.

WALLER, M. C.; SCANLON, C. H. **A Simulation Study of Instrument Meteorological Condition Approaches to Dual Parallel Runways Spaced 3400 and 2500 Feet Apart Using Flight-Deck-Centered Technology.** NASA Technical Publication, March 1999.

WOOD, C. **Instrument Landing System Basics.** Sítio na Internet, acessado em março/2010.
<http://www.navfltsm.addr.com/ils.htm>

ANEXOS

ANEXO A – Método de Monte Carlo

ANEXO B – Simulação e Código MATLAB

ANEXO C – Tabelas do Levantamento de (KUCCHAR; YANG, 2000)

ANEXO A

Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo foi desenvolvido para obter soluções aproximadas em modelos e simulações que possuem um grande número de graus de liberdade (ou variáveis independentes), ou que não apresentam uma solução fechada ou analítica trivial. Este método foi desenvolvido na década de 1940, no Laboratório de Los Alamos, a partir das ideias de Enrico Fermi e Stanislaw Ulam. As simulações de modelos de nêutrons, utilizando Monte Carlo, foram decisivas para o avanço do Projeto Manhattan e que gerou a primeira bomba atômica (METROPOLIS, 1987).

Basicamente, o método consiste em simular um número significativo de cenários, variando-se os parâmetros de entrada de forma que sigam as respectivas distribuições de valores e, a partir dos resultados obtidos, extrapolar o resultado para representar o comportamento do modelo como um todo.

A modelagem via Monte Carlo necessita que algumas condições sejam atendidas, ampliando os pontos mencionados em (METROPOLIS, 1987), dentre as quais:

- Conforme o número de simulações tenda para o número total de cenários possíveis, o resultado obtido por Monte Carlo deve convergir para o resultado esperado;
- É necessário obter as distribuições probabilísticas para as entradas utilizadas e que estas reflitam de forma bem próxima o encontrado na situação real;
- O grau de precisão das entradas e cálculos utilizados na simulação devem ser suficientes para não interferir nos resultados; e
- O gerador de números aleatórios (randômicos) deve ter um período mais alto possível e que seja próximo de um gerador perfeito, de forma que os números gerados não viciem os resultados obtidos.

O uso do gerador de números aleatórios que siga as distribuições utilizadas nos parâmetros de entrada permite que sejam geradas amostras dentro do espaço de combinações de valores de entradas, o que reduz o esforço de processamento necessário ao evitar que sejam computadas todas as possibilidades de valores de parâmetros de entrada.

Conforme a natureza do modelo simulado, a partir dos resultados obtidos, é normalmente realizada uma das seguintes ações: é calculada a frequência da métrica utilizada, é mapeado os cenários de sucesso/fracasso ou é analisado a convergência/sensibilidade dos valores obtidos, conforme se aumentam os números de simulações.

Mesmo com o esforço computacional reduzido no momento de realizar as simulações, muitos modelos que utilizam Monte Carlo precisam de máquinas com nível de processamento significativo em consequência do número de simulações necessário para obter uma precisão aceitável nos resultados.

ANEXO B

Simulação MATLAB

Neste anexo, são abordados inicialmente os aspectos de desempenho nas simulações em MATLAB, focando especialmente as estruturas que permitem o paralelismo e as ferramentas estatísticas já embutidas. Logo após, é apresentado o código utilizado nas simulações do modelo utilizado e, por fim, o código é discutido em maiores detalhes.

O MATLAB possui capacidade, na parte de paralelismo, de detecção simples de independência entre variáveis e notifica com um erro quando ocorre algum bloco de código que foi declarado como paralelizável, mas não o é devido à dependência de resultados de outras variáveis.

Para paralelizar um bloco de código, é necessário usar operadores de *loops* paralelos e, no caso do MATLAB, costumam utilizar um prefixo ‘par’ seguido pelo nome do operador de *loop* normal. Caso um bloco de código não seja paralelizável, é possível ampliar ou reduzir o bloco de código analisado, até se obter a capacidade de paralelismo.

No caso do código utilizado para as simulações de Monte Carlo, devido ao “efeito memória” presente no modelo, não é possível paralelizar o cálculo do posicionamento da aeronave. No entanto, é possível paralelizar as simulações em si, pois as entradas e saídas de uma simulação são independentes das demais. O paralelismo por simulação é o método adotado para o modelo utilizado.

O uso do paralelismo neste trabalho de pesquisa possibilitou um ganho considerável no tempo de simulação, permitindo a simulação de cenários como o do procedimento SOIA com o ILS/PRM, em que é necessário realizar inúmeras simulações para as combinações possíveis entre as variáveis de *Heading* da aeronave e a distância entre aeronaves. O tempo de processamento utilizando apenas um processador, com um núcleo, é de 60 a 75 minutos, mas com o uso de um processador de quatro núcleos, esse tempo foi reduzido para uma faixa de 20 a 30 minutos, o que mostra o ganho de tempo de processamento com o uso do paralelismo.

O MATLAB apresenta também algumas bibliotecas com funções relacionadas à área de estatística, o que possibilitou o reuso destas funções, tanto para escrever mais rapidamente o código, como também para o código resultante ficar simples. Dentre estas funções, as mais importantes para o desenvolvimento do algoritmo foram as envolvidas com as distribuições

de incertezas (o MATLAB contém as distribuições comumente utilizadas, tais como a curva normal, retangular, triangular, beta, etc.) e o gerador de números aleatórios de precisão dupla.

No caso das distribuições de probabilidades, por meio de apenas uma linha de código é possível gerar vetores e matrizes com os valores obtidos de amostragem sobre a curva de distribuição, tornando prática a geração dos números que servem de entrada para a simulação. No código utilizado, é feita em uma das primeiras etapas a geração dos valores das incertezas para todo o tempo de simulação, concentrando o tempo inicial para geração dos valores de todas as entradas da simulação, necessitando, posteriormente, apenas referenciar o local da memória onde o valor da incerteza se encontra para um dado instante de tempo.

Outro conjunto de funcionalidades presentes no MATLAB são os operadores sobre vetores e matrizes, operadores estes que contêm as operações clássicas de adição, subtração, multiplicação e divisão, e que também apresentam algumas operações tais como a multiplicação *bitwise*, que multiplica os termos de duas matrizes posição a posição, o que é diferente da multiplicação matricial usual.

A seguir, é apresentado o código utilizado neste trabalho de pesquisa, contendo também comentários qualitativos como a função da variável e os pontos de cálculo considerados mais importantes para a compreensão do modelo utilizado.

Código MATLAB do Modelo Utilizado

```

options = optimset('UseParallel','always');
matlabpool open 3;

n = 100000;           % número de simulações
t = 152;              % número de iterações em uma simulação

posicao_inicial_nave_Ax = 0;      % posição inicial da aeronave A na
coordenada X (m)
posicao_inicial_nave_Bx = 0;      % posição inicial da aeronave B na
coordenada X (m)

velocidade_nave_A = 72;          % velocidade da aeronave A (m/s)

heading_default_B_3 = 4;         % inclinação da aeronave, uso nos casos de
procedimento SOIA ou RNP

factor = 0.1;

posicao_inicial_nave_Ay = 0;      % posição inicial da aeronave A na
coordenada Y (m)
posicao_inicial_nave_By = 457 +
velocidade_nave_A*t*sind(heading_default_B_3)*factor; % posição inicial
da aeronave B na coordenada Y (m)

velocidade_min_nave_B = 57;      % velocidade máxima da aeronave B (m/s)
velocidade_max_nave_B = 88;      % velocidade máxima da aeronave B (m/s)

heading_min_nave_B = -4;         % degraus de variação angular do heading
da aeronave B
heading_max_nave_B = 4;

ACC = 0;                        % contador de violações de distância
mínima

% loop sobre o número de simulações
parfor i=1:n;

    % inicialização das variáveis
    posicao_atual_nave_Ax = posicao_inicial_nave_Ax;
    posicao_atual_nave_Bx = posicao_inicial_nave_Bx;
    posicao_atual_nave_Ay = posicao_inicial_nave_Ay;
    posicao_atual_nave_By = posicao_inicial_nave_By;

    % cálculo dos vetores de distribuição de incertezas
    velocidade_nave_B = unidrnd(velocidade_max_nave_B -
velocidade_min_nave_B, 1, t) + velocidade_min_nave_B;
    heading_nave_B_1 = (unidrnd(heading_max_nave_B - heading_min_nave_B +
1, 1, t) + heading_min_nave_B - 1) * 10;
    heading_nave_B_2 = normrnd(0, 2.5, 1, t);

    posicionamento_nave_B = normrnd(0, 11, 1, t);

    % somatória das contribuições para o heading na aeronave B
    heading_nave_B_total = heading_nave_B_1 + heading_nave_B_2 +
heading_default_B_3;

```

```

% loop sobre o número de iterações
for j=1:t;
    % atualização das posições das aeronaves A e B
    posicao_atual_nave_Ax = posicao_atual_nave_Ax + velocidade_nave_A;
    posicao_atual_nave_Bx = posicao_atual_nave_Bx +
    velocidade_nave_B(j)*cosd(heading_nave_B_total(j));

    posicao_atual_nave_Ay = posicao_inicial_nave_Ay;
    posicao_atual_nave_By = posicao_atual_nave_By +
    velocidade_nave_B(j)*sind(heading_nave_B_total(j));
    posicao_atual_nave_By = posicao_atual_nave_By -
    posicionamento_nave_B(j)*cosd(heading_nave_B_total(j));

    % cálculo da distância entre aeronaves na coordenada X
    distancia_x = posicao_atual_nave_Bx - posicao_atual_nave_Ax;

    % cálculo da distância entre aeronaves na coordenada Y
    distancia_y = posicao_atual_nave_By - posicao_atual_nave_Ay;

    % cálculo da violação (ou não) da distância
    if (((distancia_x*distancia_x) + (distancia_y*distancia_y)) <
22500)

        % se houve violação, o contador é incrementado
        ACC = ACC + 1;

        % ao encontrar uma violação, é passado para o próximo cenário
        break;
    end;
end;
end;

% cálculo percentual de violações de colisão, dentre o número de simulações
collisions = ACC / n;
matlabpool close

```

Simulação MATLAB

O código apresentado anteriormente é composto por três blocos lógicos principais:

- a inicialização das variáveis e incertezas;
- a simulação das aeronaves em si; e
- a verificação de violação de separação mínima.

Estes três blocos são sequenciais no tempo, ou seja, o primeiro bloco é a entrada para o segundo bloco, etc.

Começando pelo primeiro bloco, este realiza a inicialização das variáveis em dois escopos distintos. O primeiro deles inicializa as variáveis que terão valor fixo e constante entre simulações, bloco este identificado pelas primeiras linhas de código até o primeiro *loop parfor*. No segundo escopo, que ocorre nas primeiras linhas dentro do *loop parfor*, ocorre a inicialização das variáveis locais de simulação, tratando-se dos parâmetros que são aplicáveis a um cenário simulado específico, variando ao longo das simulações. Dentre as variáveis utilizadas nesse escopo, estão os valores de incertezas obtidos por meio de distribuições de incertezas.

No segundo bloco, cujo código constitui grande parte do *loop for* interno, são realizadas as atualizações das trajetórias das aeronaves, considerando-se as incertezas e demais parâmetros de trajetória utilizados, preparando os dados que são o objetivo do terceiro bloco. Dentre as variáveis contidas neste bloco, encontram-se as posições atuais das duas aeronaves (quebradas por componente lateral e componente longitudinal), além da distância lateral e longitudinal das aeronaves.

Já no terceiro bloco, o objetivo é avaliar se ocorreu ou a violação da separação mínima entre aeronaves e contar o número de ocorrências dessas situações para calcular o nível de risco. No caso de violação, um contador de colisões é incrementado e passa-se para a próxima simulação. Quando são executadas todas as simulações, é exibido a taxa de cenários com colisão em relação ao número total de simulações executadas.

ANEXO C

Tabelas do Levantamento de (KUCCHAR; YANG, 2000)

Legenda:

- ***Dimensions:*** Dimensões Avaliadas
 - **H:** Plano Horizontal
 - **V:** Plano Vertical
- ***Detection:*** Detecção de Conflitos
- ***Resolution:*** Resolução de Conflitos
 - **P:** Prescrita
 - **O:** Otimizada
 - **F:** Campos de Força
 - **M:** Manual
- ***Maneuvers:*** Manobras de Evasão
 - **T:** Girar
 - **V:** Mudança de Altitude
 - **S:** Mudança de Velocidade
 - **C:** Combinação de Manobras
- ***Multiple:*** Múltiplos Conflitos
 - **P:** Por Par
 - **G:** Global

Model	Dimensions	Detection	Resolution	Maneuvers	Multiple
Andrews [32]	H	—	O	T	P
Bilimoria [33]	H	—	O	C(ST)	P & G
Chakravarthy [19]	H	—	O	C(ST)	P
Frazzoli [34]	H	—	O	C(ST)	G
Tomlin [35]	H	—	O	T	G
Irvine [36]	HV	—	O	C(STV)	P
Ota [37]	HV	—	O	C(TV)	G
Kosecka [38]	H	—	F	C(ST)	G
Zeghal [4]	H	—	F	C(ST)	G
Eby [39,40]	HV	—	F	C(STV)	G
Sridhar [41]	H	✓	—	—	P
EGPWS [12]	HV	✓	—	—	—
Havel [42]	HV	✓	—	—	P
Kelly [3]	HV	✓	—	—	P
TCAD [15]	HV	✓	—	—	P
GPWS [11]	V	✓	P	V	—
PRM [13]	H	✓	P	C(TV)	P
Bilimoria [43]	HV	✓	P	STV	P
Burgess [44]	H	✓	O	TV	P
Coenen [16]	H	✓	O	ST	P
Gazit [45]	H	✓	O	VT	P
Harper [46]	H	✓	O	C(ST)	G
Iijima [17]	H	✓	O	ST	P
Niedringhaus [47]	H	✓	O	C(ST)	G
Zhao [48]	H	✓	O	T	P
Burdun [49]	HV	✓	O	C(STV)	P
Durand [50]	HV	✓	O	T	G
Ford [51]	HV	✓	O	V	P
Krozel [6,52]	HV	✓	O	STV	P
Love [53]	HV	✓	O	TV	P
Menon [54]	HV	✓	O	C(STV)	G
Niedringhaus [55]	HV	✓	O	STV	G
Schild [56]	HV	✓	O	C(TV)	P
TCAS [14]	HV	✓	O	V	P
Hoekstra [24]	HV	✓	F	C(STV)	P
Zeghal [57]	HV	✓	F	C(STV)	G
Duong [23]	HV	✓	M / F	C(STV)	P

Tabela 1 – Modelos de Propagação de Estado *Nominal*
(extraído de (KUCCHAR; YANG, 2000))

Model	Dimensions	Detection	Resolution	Maneuvers	Multiple
Lachner [20]	H	—	O	C(ST)	P
Tomlin [33]	H	—	O	S	G
Ford [58]	H	√	—	—	P
Ratcliffe [59]	HV	√	—	—	P
Shepard [60]	HV	√	—	—	P
Shewchun [61]	HV	√	—	—	P
AILS [10]	HV	√	P	C(TV)	P
Gazit [43]	H	√	O	VT	P
Vink [26]	HV	√	M	C(STV)	P

Tabela 2 – Modelos de Propagação de Estado *Pior Caso*
(extraído de (KUCCHAR; YANG, 2000))

Model	Dimensions	Detection	Resolution	Maneuvers	Multiple
Paielli [62]	H	—	—	—	P
Taylor [18]	H	—	—	—	P
Bakker [63]	HV	—	—	—	P
Wangermann [64, 65]	HV	—	O	C(STV)	G
Innocenti [66]	H	—	F	C(ST)	G
Rome [67]	H	√	—	—	P
Warren [5]	H	√	—	—	P
Williams [68]	HV	√	—	—	P
Carpenter [22]	H	√	P	C(TV)	P
Heuvelink [69]	H	√	O	S	P
Prandini [28]	H	√	O	T	P
Krozel [6]	HV	√	O	STV	P
von Viebahn [70]	HV	√	O	TV	P
CTAS [1,71]	HV	√	M	C(STV)	P
URET [2,72]	HV	√	M	C(STV)	P
Yang [29,30]	HV	√	M	C(STV)	P

Tabela 3 – Modelos de Propagação de Estado *Probabilístico*
(extraído de (KUCCHAR; YANG, 2000))