Paulo Hideshi Ogata

**AVALIAÇÃO DO PERIGO DE COLISÃO ENTRE
AERONAVES EM OPERAÇÃO DE
APROXIMAÇÃO EM PISTAS DE
ATERRISSAGEM PARALELAS**

**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. Livre-Docente João Batista Camargo Júnior**

São Paulo
2003

Dedico este trabalho aos meus pais Elvira e Seitti,
a minha esposa Elaine e aos meus filhos Juliana e Thiago.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. João Batista Camargo Júnior pela orientação desde o início desta dissertação, pelas diretrizes seguras e permanente incentivo na elaboração deste trabalho.

A minha mãe e ao meu pai pelo total apoio a minha formação e incentivo pela busca do conhecimento e da verdade.

A minha esposa e aos meus filhos pela compreensão, apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Major Eno Siewerdt – Atech, Tecnologias Críticas, pela colaboração e suporte nas atividades relacionadas ao setor do transporte aéreo desenvolvidas no grupo de Análise de Segurança (GAS).

Ao estagiário André Ricardo Koepl pela colaboração nas simulações.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma contribuição para a avaliação dos níveis de perigo em sistemas críticos de segurança. Neste trabalho é proposta a modelagem de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão com base na avaliação do nível perigo de colisão entre duas aeronaves em operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas (UCSPA – *Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*). Esta ferramenta apresenta resultados promissores, em termos da análise na minimização do espaçamento entre as pistas paralelas, de acordo com o nível máximo de perigo regulamentado pelo setor. Esta ferramenta tem como base um modelo dinâmico de duas aeronaves em operação de aproximação no cenário UCSPA, sob condições meteorológicas adversas. A predição da posição da aeronave intrusa é modelada por meio de incertezas traduzidas em termos de distribuições de probabilidades, cujas distribuições representam as incertezas na proa, posição lateral, posição longitudinal e velocidade. A ferramenta computacional utilizada na simulação e na obtenção dos dados numéricos está fundamentada no Método de Monte Carlo.

ABSTRACT

This research presents a contribution to hazard level assessment of safety critical systems. In this work is proposed an aid tool modeling for decision-making process based on collision hazard evaluation between two aircrafts on UCSPA (Ultra Closely Spaced Parallel Approaches) scenario. This tool presents promising results, in terms of parallel runways spacing minimization analysis, according to the maximum hazard level regulated by the sector. This tool is based on a dynamic model of two aircrafts on UCSPA scenario under Instrument Meteorological Conditions (IMC). The predicted intruder aircraft position is modeled taking into account some uncertainties translated in terms of probability distributions. These probability distributions represent uncertainties associated with heading, lateral position, longitudinal position and speed. The computation tool used in the simulation to obtain the numerical data is based on Monte Carlo Method.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo	3
1.2.	Apresentação da Dissertação	5
2.	ANÁLISE DE RISCO EM SISTEMAS CRÍTICOS	6
2.1.	Introdução	6
2.2.	O Fator Humano e a Automação	8
2.3.	Análise de Risco e de Perigo	10
	2.3.1. Risco e Perigo	10
	2.3.2. Análise de Risco e Análise de Perigo	11
	2.3.3. Divisão Funcional da Análise de Risco	13
	2.3.4. Fontes de Risco	21
3.	RISCOS NO CONTEXTO DA NAVEGAÇÃO AÉREA	23
3.1.	O Sistema de Controle de Tráfego Aéreo	23
	3.1.1. Introdução	23
	3.1.2. Futuros Sistemas de Navegação Aérea	28
3.2.	Operação de Aproximação em Pistas de Aterrissagem Paralelas	30
	3.2.1. Conceituação	30
	3.2.2. Elementos de Análise das Pistas de Aterrissagens Paralelas	35

3.3.	Análise de Perigo em Pistas de Aterrissagem Paralelas	38
3.4.	Modelos de Análise de Colisão entre Aeronaves	41
4.	MÉTODO DE MONTE CARLO	47
4.1.	Introdução	47
4.2.	Princípios do Método de Monte Carlo	49
4.2.1.	Conceitos Básicos	49
4.2.2.	Exemplos de Aplicações do Método de Monte Carlo	51
4.3.	Números Aleatórios e Pseudoaleatórios	59
4.4.	Técnicas de Geração de Números Pseudoaleatórios	61
4.4.1.	Números Pseudoaleatórios Uniformemente Distribuídos	61
4.4.2.	Método da Transformada Inversa	66
5.	PROPOSTA DE AVALIAÇÃO DE PERIGO EM PISTAS DE ATERRISSAGEM PARALELAS	69
5.1.	Métricas de Risco	69
5.2.	Modelo de Avaliação de Perigo	71
5.2.1.	Descrição do Modelo de Avaliação de Perigo	71
5.2.2.	Influência no Espaçamento entre as Pistas Paralelas	74
5.2.3.	Modelo Dinâmico das Aeronaves	78
5.3.	Passos na Implementação do Algoritmo	82
5.4.	Posicionamento da Aeronave Intrusa	84
6.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	87
6.1.	Resultados Alcançados	87
6.2.	Análise dos Resultados	90
6.3.	Análise dos Principais Parâmetros	95
6.3.1.	Influência do Parâmetro Perda de Separação Lateral	95
6.3.2.	Influência de Outros Parâmetros	97

7.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
7.1.	Conclusões	99
7.2.	Considerações Finais	100
7.3.	Aplicações Práticas Relacionadas à Dissertação	103
7.4.	Futuras Linhas de Pesquisa	104
7.4.1.	Estudo da Influência das Turbulências nas Operações de Aproximação em Pistas de Aterrissagem Paralelas	104
7.4.2.	Estudo da Minimização do Parâmetro NOZ (Zona de Operação Normal)	104
7.4.3.	Estudo do Modelo de Crescimento de Células Aplicado ao Controle de Tráfego Aéreo	105
ANEXO	Glossário	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1	Causas dos Acidentes e Incidentes Aéreos	7
Fig. 2.2	Componentes do Risco	11
Fig. 2.3	Classificação da Análise de Risco	14
Fig. 2.4	Risco Tolerável e ALARP	20
Fig. 3.1	Fases de Operação no Espaço Aéreo	24
Fig. 3.2	Padrões de Separação (VFR x IFR)	33
Fig. 3.3	Geometria de Pistas Convergentes	34
Fig. 3.4	Aproximação Paralela com Zona de Não Transgressão (NTZ)	35
Fig. 3.5	Atrasos na Operação de Aproximação em Pistas Paralelas	36
Fig. 3.6	Árvore de Falha: Aproximação em Pistas Paralelas	40
Fig. 3.7	Zona Protegida e de Alerta	43
Fig. 3.8	Encontro Geométrico em 2D	44
Fig. 4.1	Simulação de um Sistema Arbitrário pelo Método de Monte Carlo	50
Fig. 4.2	Gráfico da Função $f(x)$	51
Fig. 4.3	Sistema de Linhas Paralelas	53
Fig. 4.4	Área D entre as Curvas	54
Fig. 4.5	Processo de Transição Cronológica do Estado dos Componentes	57
Fig. 4.6	Processo de Transição Cronológica do Estado do Sistema	58
Fig. 4.7	Gerador de Números Aleatórios Mecânico	59
Fig. 5.1	Nível de Perigo x Número de Simulações	73
Fig. 5.2	Determinação de ALARP pela Curva de Risco	74
Fig. 5.3	Operação de Aproximação em Pistas de Aterrissagem Paralelas	78
Fig. 5.4	Modelo de Detecção de Conflito	79
Fig. 5.5	Determinação do Posicionamento das Aeronaves	85
Fig. 6.1	Probabilidade de Perigo de Colisão x Espaçamento entre as Pistas Paralelas	90

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1	Lista de Cenários	12
Tab. 2.2	Principais Métodos de Análise de Perigo	15
Tab. 2.3	Aceitabilidade dos Níveis de Riscos Fatais Anuais	18
Tab. 3.1	Principais Aeroportos nos EUA	34
Tab. 3.2	Pistas de Aproximação Paralelas no Brasil	35
Tab. 3.3	Tipos de Domínios e Cenários	38
Tab. 5.1	Métricas Aplicáveis no Setor Aéreo	70
Tab. 6.1	Resultados obtidos pelo Modelo de Análise de Perigo Proposto	88
Tab. 6.2	Nível de Perigo nas Operações UCSPA para 500.000 simulações	89
Tab. 6.3	Número de Intrusões não Recuperáveis Livres versus L	95
Tab. 6.4	Influência do Parâmetro Perda de Separação Lateral	96
Tab. 6.5	Exemplos de Incertezas FTE e NSE	97
Tab. 6.6	Influência do Parâmetro TSE/NSE	98
Tab. 7.1	Probabilidade de Conflito x Espaçamento (Modelo de Comparação)	101
Tab. 7.2	Probabilidade de Conflito x Espaçamento (Modelo Proposto)	101
Tab. 7.3	Viabilidade de Uso das Pistas: Modelo Proposto x Modelo de Comparação	102
Tab. A.1	Categorias de Aproximação por ILS	111

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Risco
s_i	Cenários
p_i	Probabilidade de ocorrência do cenário em consideração
c_i	Consequência ou medida de avaliação do cenário considerado
ϕ_i	Frequência de ocorrência do cenário s_i
$p_i(\phi_i)$	Função densidade de probabilidade de ϕ_i do i -ésimo cenário
$\xi_i(c_i)$	Função densidade de probabilidade da consequência
ϕ_r, β_k	Proa (<i>heading</i>)
$\vec{n}$	Vetor unitário paralelo à trajetória da aeronave intrusa
$\vec{i}$ e $\vec{j}$	Vetores unitários dos eixos das coordenadas x e y
$\vec{P}_r$	Vetor posição da aeronave intrusa relativa à aeronave de referência
$s_{\min}$	Separação mínima entre a aeronave de referência e intrusa
$\{S_t^i\}$	Processo estocástico da posição de uma aeronave i no tempo t
$\{V_t^i\}$	Processo estocástico da velocidade de uma aeronave i no tempo t
s_t^i	Elementos de $\{S_t^i\}$
v_t^i	Elementos de $\{V_t^i\}$
D^c	Complemento de D
$\varphi(t)$	Taxa de cruzamento (<i>in-crossing rate</i>)
$P_{ic}(t_1, t_2)$	Probabilidade de ocorrência do evento cruzamento (<i>in-crossing</i>)
ξ_i	Valores de uma variável aleatória ξ
$E[\xi], \mu_\xi$	Média ou esperança da variável aleatória ξ
$V[X]$	Variância da variável aleatória X
$M_n(X)$	Média amostral da variável aleatória X
π	Número irracional π
$F_X(x)$	Função densidade de probabilidade marginal da variável aleatória X
$F_A(\alpha)$	Função densidade de probabilidade marginal da variável aleatória A
$F_{X,A}(x, \alpha)$	Função distribuição de probabilidade cumulativa conjunta das variáveis aleatórias X (distância) e A (ângulo)

λ_i e μ_i	Taxa de falhas e taxa de reparos do componente i
R_S	Confiabilidade do sistema
R_i	Confiabilidade do subsistema i
Q_S	Não confiabilidade do sistema
T_i	Duração do estado do componente i
mod m	Operação módulo m
ρ	Coeficiente de correlação
P_j, Q_j	Pontos da trajetória (aeronave intrusa e referência)
u, v	Velocidade (aeronave de referência e intrusa)
T_j	Tempo de chegada nominal em cada ponto P_j ou Q_j
$p(t), q(t)$	Posição nominal (aeronave intrusa e referência)
μ, σ	Média e desvio padrão da distribuição de probabilidade gaussiana
L	Espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas
P_x, P_y	Posição da aeronave intrusa em relação aos eixos x e y
PH_L	Valor do nível de perigo obtido na simulação em função do espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas
s^r, q^r	Distância e posição nominal da aeronave de referência
s^i, p^i	Distância e posição nominal da aeronave intrusa

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ACC	Centro de Controle de Área
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast
AILS	Airborne Information for Lateral Spacing
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
APP	Centro de Controle de Aproximação
ARTCC	Air Route Traffic Control Center
AS	Alert Services
ASR	Airport Surveillance Radar
ATC	Air Traffic Control
ATCT	Airport Traffic Control Towers
ATM	Air Traffic Management
ATS	Air Traffic Services
CD&R	Conflict Detection and Resolution
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Tráfego Aéreo
CNS/ATM	Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management
CSPA	Closely Spaced Parallel Approaches
DCIA	Dependent Converging Instrument Approaches
DEPV	Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo
DGPS	Differential Global Positioning System
ETA	Event Trees Analysis
EUROCONTROL	European Organization for the safety of Air Navigation
exp	exponencial (e)
FAA	Federal Aviation Administration
FANS	Future Air Navigation System
FIR	Flight Information Region
FIS	Flight Information Services
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
FTE	Flight Technical Error
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System

HAZOP	Hazard and Operability Analysis
ICAO	International Civil Aviation Organization
IEC	International Electrotechnical Commission
IFR	Instrument Flight Rules
ILS	Instrument Landing System
IMC	Instrument Meteorological Conditions
LAAS	Local Area Augmentation System
MD	Perda de separação (<i>miss distance</i>)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOZ	Normal Operating Zone
NPB _{livre}	Número Permitido de Intrusões Não Recuperáveis (<i>blunders</i>) que podem ocorrer livremente
NSE	Navigation Sensor Error
NTSB	National Transportation Safety Board
NTZ	No Transgression Zone
PHA	Preliminary Hazard Analysis
PRM	Precision Runway Monitor
RA	Resolution Advisories
SCIA	Simultaneous Converging Instrument Approaches
SRPV	Serviços Regionais de Proteção ao Voo
TA	Traffic Advisories
TCAS	Traffic Alert and Collision Avoidance System
TSE	Total System Error
TRACON	Terminal Radar Approach Control
TWR	Centro de Controle de Aeródromo
UCSPA	Ultra Closely Spaced Parallel Approaches
VFR	Visual Flight Rules
VMC	Visual Meteorological Conditions
VOR	VHF Omni directional Range
WAAS	Wide Area Augmentation System

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os serviços ou aplicações disponibilizados à comunidade têm como mola propulsora, a descoberta de novas tecnologias ou evolução nos sistemas existentes. O fato relevante nesse processo é a clara indicação de que estes avanços são realizados por meio do uso de tecnologias que, de alguma forma, utilizam-se de sistemas computacionais embarcados.

Porém, em alguns casos, os serviços ou aplicações a serem disponibilizados dependem de certos requisitos de operação do sistema, requisitos estes considerados críticos, desde que um mau funcionamento no sistema pode resultar em sérias consequências a seus usuários. Genericamente, tais sistemas são denominados de *sistemas críticos de segurança*. Requisitos típicos no projeto desses sistemas incluem a proteção à vida humana, ao meio ambiente ou dos recursos materiais. Em sistemas críticos, a denominação segurança refere-se sempre à expressão “*safety*” em contraposição ao termo “*security*”.

No projeto, desenvolvimento e exploração comercial de serviços ou aplicações baseados em sistemas críticos (aviação, plantas nucleares ou químicas, por exemplo), alguns fatores são abordados pelo grupo interessado na análise de risco do negócio, auxiliando-o no processo de tomada de decisão. Sob o ponto de vista econômico do empreendedor, estes fatores incluem o montante do investimento, a análise da lucratividade, o mercado potencial, a concorrência, o risco de perdas monetárias, o retorno financeiro, entre outros. Contudo, sob a ótica da respectiva agência reguladora responsável e a sociedade em geral, a preocupação básica é sempre referenciada em termos da proteção à vida e à propriedade.

Portanto, independente do tipo de sistema crítico considerado, o sucesso do empreendimento deve estar relacionado com o cumprimento dos critérios de *segurança (safety)* e da *confiabilidade* do sistema, sem os quais os benefícios dos mais sofisticados sistemas e tecnologias serão em vão.

Em outras palavras, a segurança deve representar para a comunidade envolvida (órgão regulador, fabricantes e operadoras), a principal prioridade em garantir níveis mínimos de risco aos usuários finais. Exemplo ilustrativo dessa preocupação é encontrado no setor da aviação. Segundo a *National Aeronautics and Space*

Administration (NASA) 1996, a história da aviação foi caracterizada por períodos de rápidos avanços tecnológicos que diminuiram drasticamente o número de acidentes aéreos, seguida de períodos com taxas comparativamente estáveis, como reflexo direto dos avanços industriais no setor e das mudanças nos regulamentos. Ressalta-se, porém, que as mudanças relacionadas à segurança foram identificadas por meio de investigações realizadas somente após os acidentes ou incidentes aéreos. Os primeiros programas com respeito à segurança nesse setor têm suas origens nos primórdios da aviação comercial, após a Primeira Guerra Mundial.

Segundo Johnson (1989), a segurança é uma característica de um sistema crítico definida como a probabilidade, em um determinado período de tempo, de que o sistema executará corretamente suas funções. Em caso de descontinuidade, o sistema deve buscar um estado final de forma a não interromper a operação de outros sistemas ou comprometer a segurança de quaisquer pessoas associadas ao sistema. Portanto, a segurança indica a capacidade do sistema em buscar um estado final seguro em caso de falha (*fail-safe*).

A *confiabilidade* atribuída a um sistema implica que o mesmo irá executar corretamente suas funções e de forma consistente ao longo de um determinado período de tempo. A confiabilidade de um sistema como uma função do tempo, indica a probabilidade condicional de que o sistema estará funcionando no intervalo de tempo $[0, t]$, dado que estava operacional no instante $t = 0$. O termo confiabilidade é também utilizado na qualificação de sistemas cujo reparo não possa ocorrer de imediato. Inclui-se nesta categoria, os módulos de controle de sistemas de satélites e situações onde aplicações críticas, executadas ou controladas por computadores, não possam apresentar falhas como nas funções relacionadas ao controle de aeronaves em vôo (Siewiorek; Swarz, 1982).

De modo geral, os sistemas críticos de segurança podem estar sujeitos à ocorrência de algum tipo de problema ou anormalidade durante a sua operação. Segundo Camargo (2002), existe no Brasil muita discussão e pouca padronização no que se refere à terminologia que caracteriza a ocorrência de problemas ou anormalidades em sistemas relacionados com a segurança. As expressões indicativas de problemas incluem *fault*, *error* e *failure*, termos estes imprescindíveis para o perfeito

entendimento das idéias nesta área. De acordo com o autor, a melhor terminologia corresponde às seguintes traduções: *fault* como *falha*, *error* como *erro* e *failure* como *disfunção*.

Ao longo deste trabalho serão utilizadas as seguintes definições com base em (Camargo, 2002) e (Camargo, 1996):

- *Fault* → falha: indicativo de uma imperfeição, defeito ou deficiência de um componente ou circuito, em termos de hardware. Em se tratando de software, indica o resultado de uma implementação incorreta ou omissão de dados em um programa de computador, usualmente conhecido como *bug*.
- *Error* → erro: corresponde à manifestação de uma falha, de modo que sua ocorrência pode contaminar outros processos internos ao sistema, alterando o resultado ou a saída esperada.
- *Failure* → disfunção: corresponde a um procedimento, uma rotina ou função executada de maneira incorreta e, portanto, representativo da exteriorização do erro para o meio externo. Outras denominações para o termo disfunção incluem avaria ou mau funcionamento.

A seguir são apresentados o objetivo desta dissertação e uma breve descrição dos capítulos que compõem este trabalho de pesquisa.

1.1. Objetivo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação está inserido no âmbito da Análise de Perigo com aplicação no setor aéreo de transporte. Nesta pesquisa é considerado um ambiente ditado pela necessidade de otimização do uso do espaço aéreo, em particular nas operações de aproximação de aeronaves em pistas de aterrissagem paralelas sob condições meteorológicas adversas. Na literatura técnica, este conceito é denominado CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*) sob condições IMC (*Instrument Meteorological Conditions*).

Especificamente, neste trabalho, são considerados aeroportos com pistas de aterrissagem paralelas, cujo espaçamento entre as linhas centrais das pistas estejam entre 750 e 1500 pés (228,6 ~ 457,2m). Este cenário é denominado de UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*) (Houck; Powell, 2001).

No contexto UCSPA, o fundamento básico para a otimização do espaço aéreo nas vizinhanças de aeroportos dotados de pistas de aterrissagem paralelas, advém da necessidade de suportar o crescimento do tráfego aéreo previsto para as próximas décadas. A concretização desta otimização, sob todos os aspectos, tem como suporte o conceito dos futuros sistemas de navegação aérea, CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management*), recomendado pelo fórum da aviação civil internacional ICAO (*International Civil Aviation Organization*).

Os futuros sistemas de navegação aérea abrem novas possibilidades para o transporte aéreo através da introdução de procedimentos mais flexíveis aos controladores de tráfego aéreo e pilotos. Estes novos procedimentos possibilitarão aos pilotos a escolha de rotas otimizadas, em tempo real, entre um ponto de origem e destino, sendo suportados por meio do uso de novos dispositivos e novas tecnologias embarcadas nas aeronaves, permitindo, de forma segura, o atendimento à demanda do tráfego aéreo (Tomlin; Pappas; Sastry, 1998) e (Wells, 2001).

O objetivo deste trabalho é a proposição de um modelo de avaliação de perigo de colisão entre duas aeronaves em operação de aproximação simultânea em pistas de aterrissagem paralelas sob condições meteorológicas adversas (UCSPA). O modelo proposto pode ser utilizado, quando necessário, como ferramenta de auxílio à tomada de decisão em termos da análise dos níveis de perigo presentes nessas operações em função do espaçamento entre as linhas centrais das pistas de aterrissagem paralelas.

Sob outra ótica, a partir dos resultados obtidos, pode-se executar análises posteriores com respeito à minimização do espaçamento entre as pistas paralelas com base em um dado nível de perigo correntemente aceito como referência. Para a obtenção dos resultados numéricos na simulação (nível de perigo associado ao espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas) é utilizado o método de Monte Carlo.

1.2. Apresentação da Dissertação

A organização deste trabalho é feita em 7 (sete) capítulos e 1 (um) anexo, brevemente descrito a seguir:

No capítulo 2, Análise de Risco em Sistemas Críticos, são apresentados os fundamentos da disciplina Análise de Risco. São abordados os principais conceitos, definições e abrangência da área.

O capítulo 3, Riscos no Contexto da Navegação Aérea, introduz os principais conceitos relacionados ao controle de tráfego aéreo e sua evolução. Em seguida, é apresentado o cenário geral da pesquisa correspondente às operações de aproximação em pistas de aterrissagens paralelas (CSPA - *Closely Spaced Parallel Approaches*).

No capítulo 4, Método de Monte Carlo, é apresentada a técnica de Monte Carlo como ferramenta utilizada na modelagem de problemas e na obtenção de resultados numéricos. Métodos de geração de números pseudoaleatórios utilizados na técnica de Monte Carlo são também discutidos.

No capítulo 5, Proposta de Avaliação de Perigo em Pistas de Aterrissagem Paralelas, são abordadas inicialmente as métricas adequadas no âmbito do setor aéreo. Em seguida, é apresentada a proposta de modelagem da ferramenta de avaliação de perigo aplicável nas operações de aproximação UCSA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*).

No capítulo 6, Resultado da Simulação, são apresentados os resultados das simulações e as análises pertinentes.

No capítulo 7, Conclusões e Considerações Finais, é reservado para as discussões dos resultados obtidos e as conclusões finais. São apresentadas também algumas contribuições de cunho prático relacionado à dissertação, além de apontar outros aspectos que mereçam continuidade de pesquisa.

O anexo, Glossário, contém as definições dos principais termos utilizados neste trabalho e relacionados ao setor da aviação.

2. ANÁLISE DE RISCO EM SISTEMAS CRÍTICOS

Neste capítulo é apresentada a conceituação envolvida na Análise de Risco, cujos fundamentos são utilizados neste trabalho. Em seguida, uma breve discussão com respeito aos temas fator humano e automação são também abordados.

2.1. Introdução

Acidentes infelizmente acontecem. Genericamente, o termo acidente pode ser definido como uma sequência de eventos (acontecimentos casuais, fortuitos, imprevisíveis ou infelizes), cujos resultados (consequências), são traduzidos em danos às pessoas (morte ou ferimentos graves) e prejuízos à propriedade como também ao meio ambiente.

Na aviação, segundo o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) 2002 e Wells 2001, “acidente aéreo representa toda ocorrência relacionada com a operação de uma aeronave e que tenha se sucedido entre o período que uma pessoa nela embarca com a intenção de realizar um voo, até o momento em que todas as pessoas tenham dela desembarcado”. Como consequências dessa ocorrência estão inclusos os seguintes danos:

- Qualquer pessoa que sofra lesão grave ou venha a falecer em virtude de estar na aeronave ou que tenha estado em contato direto com qualquer parte da aeronave (exposição à hélice, ao jato, etc.);
- A aeronave sofra dano estrutural ou que seja considerada desaparecida ou que se tenha substituído grande parte de seus componentes.

O termo *incidente* aéreo é considerado como um evento em um sentido bem próximo de *quase-acidente*, desde que suas consequências não resultam em seqüelas ou danos graves às pessoas ou à propriedade (Wells, 2001).

Diversas são as origens dos acidentes ou incidentes aéreos. As fontes mais conhecidas são as falhas mecânicas nos componentes das aeronaves. Porém, em alguns casos, as causas reais são de difícil localização, uma vez que dependem de

outros fatores que não estão relacionados diretamente às aeronaves. O grau de importância (valores) assumido pela política do governo, por exemplo, em termos de uma regulamentação adequada e dos orçamentos provisionados ao setor, pode afetar indiretamente as atividades que estejam sob sua responsabilidade. Essas atividades incluem a previsão do tempo e comunicação, o sistema de controle de tráfego aéreo e a seleção e treinamento dos controladores de tráfego aéreo. Estas decisões têm um efeito amplo com reflexo na gerência do tráfego aéreo e na capacidade dos controladores e, conseqüentemente, nas causas dos acidentes e incidentes aéreos.

A Figura 2.1 ilustra essa abordagem, onde é apresentado o inter-relacionamento dos diversos fatores que podem influenciar na origem dos acidentes e incidentes aéreos, segundo o *National Transportation Safety Board (NTSB)* apud Wells (2001).

Fig. 2.1 - Causas dos Acidentes e Incidentes Aéreos

2.2. O Fator Humano e a Automação

Outro aspecto relacionado aos acidentes em geral refere-se à automação, dado os avanços nas técnicas e processos da engenharia. Estes avanços tecnológicos, principalmente pelo uso de computadores, têm permitido a automação de muitos processos e trabalhos antes manuais. A automação abrange vários aspectos e, como regra geral, relaciona-se com os seguintes objetivos: aumento da produtividade, redução de custos, redução de fadiga e de tempo em processos repetitivos, precisão no manuseio de informações e atendimento a certos critérios de segurança.

Nos sistemas críticos, a automação é fundamentada principalmente com relação ao controle de alguns sistemas mais complexos, cujos requisitos de segurança excedem a capacidade e as habilidades humanas (Leveson, 1995).

Porém, no setor aéreo, Scardigli (2002) assinala que, “a vulnerabilidade do sistema do setor aéreo frente a problemas, poderá originar-se de algumas aplicações devido à complexidade das informações contidas nas centenas de computadores embarcados em um avião de carreira. Apesar da tecnicidade da aviação comercial estar particularmente avançada em termos de automação dos vãos e, portanto, proporcionando eficiência econômica, crescimento do desempenho e regularidade nos vãos, deve-se levar em conta que, os idealizadores do *‘totalmente digital’* também são seres humanos e podem cometer erros que conduzem a acidentes”.

No transporte aéreo, a pressão para aumentar o número de vãos de forma segura e eficiente, tem levado à comunidade do setor a desenvolverem novas propostas com respeito a equipamentos mais poderosos e confiáveis e, paralelamente, aumentando-se o nível de automação das facilidades pertinentes ao controle de tráfego aéreo.

Segundo Wickens et al (1998), tais propostas têm levantado algumas preocupações no sentido de que a automação possa comprometer a segurança do sistema pela marginalização das habilidades do controlador de tráfego aéreo em prover as ações necessárias quando da interrupção do sistema automatizado. Vários estudos têm mostrado que uma automação bem projetada pode ajudar o operador humano e, conseqüentemente, melhorar o desempenho do sistema. Como exemplo, pode-se

citar no gerenciamento do tráfego aéreo, o processo de *handoff* ^(*) automático (passagem da aeronave de um setor aéreo para outro) e o uso de displays como ferramenta de auxílio no seqüenciamento de aeronaves.

Com respeito ao fator humano, uma suposição bastante difundida na literatura refere-se à atribuição generalizada do elemento humano como o maior agente responsável pelos acidentes no setor aéreo (NASA, 1996). Nas plantas nucleares, o percentual atribuído a erros humanos está situado na faixa de 50% a 70% (LaSala, 1998). Naturalmente, o resultado destas estatísticas não deve surpreender, desde que o elemento humano está de fato, direta ou indiretamente envolvido na maioria dos acidentes que ocorrem nas plantas industriais de qualquer natureza. No transporte aéreo, o fator humano é representado pela figura dos pilotos, controladores de tráfego aéreo, equipes de manutenção e operadoras.

Contudo, segundo Johnson (1980) apud Leveson (1995), por meio de uma investigação mais detalhada sobre um determinado acidente, invariavelmente foram encontrados como causas dos acidentes, condições não seguras dos equipamentos ou sistemas. Dessa forma, apesar dos percentuais de 60 a 80% dos acidentes, em várias indústrias pesquisadas, serem atribuídos indistintamente ao fator humano, determinou-se que em 75% destes casos, diversas funcionalidades do sistema de segurança não operavam corretamente e precediam da ação do operador.

Em sistemas críticos de segurança, o erro humano é definido como qualquer desvio no desempenho de uma seqüência de ações especificadas ou prescritas. Contudo, instruções e procedimentos escritos quase nunca são seguidos. Estudos realizados com operadores em ambientes de alto risco, como nas plantas nucleares, modificações nas instruções são repetidamente encontradas e a violação das regras parece ser bastante compreensível, em face da carga de trabalho que os operadores são submetidos (Leveson, 2002).

(*): Transferência da identificação radar de uma aeronave sob controle de um controlador de tráfego aéreo para outro quando a aeronave entrar no espaço aéreo de outro controlador de tráfego aéreo. Neste caso, a comunicação rádio também é transferida.

Nestas situações, existe um conflito básico entre o *erro* visto como um desvio dos *procedimentos normativos* e, o *erro* visto como um desvio dos *procedimentos efetivamente* utilizados racionalmente e usualmente. Como implicação, após a análise minuciosa de um acidente, será fácil encontrar alguma pessoa envolvida no fluxo dinâmico dos eventos e que tenha violado as regras formais, seguindo-se a *prática estabelecida* em vez da *prática especificada*. Portanto, devido aos desvios freqüentes da prática estabelecida, a partir de instruções e regras normativas de trabalho, não deixa de ser surpresa que erros de operadores sejam encontrados como causa em 70 a 80% dos acidentes analisados (Leveson, 2002).

2.3. Análise de Risco e de Perigo

A seguir são introduzidos os conceitos básicos relacionados com a área de pesquisa denominada de Análise de Risco e de Perigo. A análise de risco e de perigo é aplicada em diversos campos como na saúde (medicamentos), na alimentação, no transporte de passageiros em geral, na análise de investimentos, entre outras.

2.3.1. Risco e Perigo

A expressão risco é freqüentemente utilizada no âmbito popular como também pela mídia nos mais variados sentidos, tais como: risco de negócio, risco social, risco econômico, risco de investimentos, risco militar, risco país, etc.

O conceito inerente da expressão risco (*risk*) envolve sempre incertezas e algum tipo de perda ou dano. Nessas condições, pode-se escrever a relação “*risco = incertezas + dano*”, enquanto que o perigo (*hazard*) é subtendido como uma fonte em potencial, sempre existente, que pode induzir a ocorrência de algum acidente. Portanto, risco indica a severidade de perda ou lesão e o grau de probabilidade dessas perdas, ou seja, a probabilidade da conversão de sua fonte em potencial, representada pelo perigo, em um acidente. Simbolicamente, este conceito pode ser expresso por “ $risco = \frac{perigo}{salvaguarda}$ ”, onde a expressão *salvaguarda* deve ser entendido como o resguardo ou proteção a uma fonte potencial que possa causar um dano. Dessa

expressão, pode-se concluir que o risco pode ser tão pequeno quanto se deseja, mas nunca zero (Kaplan; Garrick, 1981).

O inter-relacionamento entre os conceitos de risco e perigo é apresentado na Figura 2.2 (Leveson, 1995). No desenvolvimento deste trabalho é adotada esta abordagem.

Fig. 2.2 - Componentes do Risco

Neste caso, o risco é definido como sendo o nível de perigo combinado com:

- A probabilidade de o perigo levar a um acidente e,
- A exposição ou duração do perigo (latência).

O perigo tem duas importantes características: a gravidade (algumas vezes denominada de severidade) e a probabilidade de sua ocorrência; a combinação de ambas é denominada nível do perigo. Portanto, quanto maior o nível do perigo, maior a chance de ocorrência do acidente.

A exposição ou duração do perigo é uma componente do risco que afeta o cálculo do nível de risco total do sistema sob análise, ou seja, a coincidência de determinados eventos e necessários para a ocorrência de um acidente (probabilidade de o perigo conduzir a um acidente) pode ter, estatisticamente uma baixa probabilidade, mas a probabilidade de coincidência desses eventos pode ser aumentada, caso o perigo esteja presente por longos períodos de tempo.

2.3.2. Análise de Risco e Análise de Perigo

É freqüente a confusão principalmente entre as expressões Análise de Risco e Análise de Perigo, onde é considerável a ocorrência da sobreposição entre ambos os termos. Muitos autores utilizam indistintamente a expressão análise de risco como sinônimo de análise de perigo (Henley; Kukamoto, 1981).

Conceitualmente, a análise de risco pode ser definida como um processo sistemático de avaliação em nível de sistema, cujo objetivo é responder as seguintes questões quanto aos perigos em potencial (Kaplan; Garrick, 1981):

- O que pode acontecer? (o que pode dar errado?);
 - Quanto provável o evento acontecerá?;
 - Se o evento acontecer, quais as conseqüências?
- (1)

Nessas condições, é criada uma lista de resultados (possíveis cenários) como apresentada na Tabela 2.1.

Tab. 2.1 - Lista de Cenários

cenário	probabilidade	conseqüência
s_1	p_1	c_1
s_2	p_2	c_2
...	...	...
s_N	p_N	c_N

onde:

s_i : identificação ou descrição do cenário (acidente).

p_i : probabilidade de ocorrência do cenário em consideração.

c_i : conseqüência ou medida de avaliação do cenário considerado (medida do dano).

Segundo Kaplan; Garrick (1981), se a Tabela 2.1 contém todos os possíveis cenários de um acidente em específico, pode-se dizer que esta tabela representa a resposta às questões formuladas em (1) e conseqüentemente, o risco. Formalmente, pode-se escrever que o risco (R) é o conjunto das triplas definido por:

$$R = \{(s_i, p_i, c_i)\}, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

Caso incertezas sejam associadas aos cenários e as conseqüências (danos) em termos de uma distribuição de probabilidade, então:

$$R = \{(s_i, p_i(\phi_i), \xi_i(c_i))\}, i = 1, 2, \dots, N \quad \text{onde} \quad (3)$$

ϕ_i - frequência de ocorrência do cenário s_i .

$p_i(\phi_i)$ - função densidade de probabilidade da frequência ϕ_i do i -ésimo cenário.

$\xi_i(c_i)$ - função densidade de probabilidade da conseqüência (dano).

Um fato relevante da análise de risco refere-se à quantificação sistemática das fontes e dos efeitos das incertezas no sistema sob análise, permitindo que seja revelado o

grau de confiança de uma predição em particular, e que sob certas condições, permita suportar a tomada de alguma decisão (Brand; Small, 1995).

A análise de perigo, por outro lado, é parte integrante da análise de risco. A análise de perigo corresponde às atividades onde são identificadas e/ou quantificadas, por um processo adequado, os níveis de perigo (gravidade e a probabilidade de ocorrência do perigo) decorrentes do uso de sistemas ou equipamentos.

O perigo não é uma propriedade inerente de um sistema, mas um conjunto de condições (estados) associados ao sistema que tem o potencial para causar algum mal ou que possa conduzir a um acidente. Portanto, o perigo é dependente da forma como os limites do sistema foram desenhados, isto é, da definição clara de quais condições são consideradas partes do perigo e quais são pertinentes ao ambiente do sistema analisado (Leveson, 1995).

Neste contexto, uma aeronave que esteja em rota de vôo pode atingir um estado perigoso. Se um acidente aéreo é definido como a colisão entre duas aeronaves, então o estado de perigo apropriado a ser considerado neste caso é a falta de separação (lateral, vertical e/ou longitudinal) mínima entre as aeronaves. Nessas condições, a análise de perigo está relacionada com a identificação/avaliação do nível do perigo de colisão entre as aeronaves. Na análise de risco são levados em consideração outros parâmetros como a duração do estado de perigo e as conseqüências resultantes em termos das probabilidades de danos às pessoas, aeronaves e propriedade.

2.3.3. Divisão Funcional da Análise de Risco

Funcionalmente, a Análise de Risco compreende as áreas denominadas de Avaliação de Risco, Gerenciamento de Risco e Comunicação de Risco, segundo Ayyub; Bender (1999). Porém, outras áreas correlatas e referentes à Aceitabilidade do Risco e Percepção do Risco também podem compor, em um escopo mais geral, o processo da análise de risco como ilustra a Figura 2.3. Uma breve descrição dessas áreas é apresentada a seguir.

Fig. 2.3 - Classificação da Análise de Risco

A) Avaliação de Risco (*Risk Assessment*) - processo técnico e científico pelo qual o risco previsto em um sistema é modelado e quantificado. A avaliação de risco permite fornecer dados qualitativos e quantitativos para posterior tomada de decisão na fase de gerenciamento de risco. Na execução da avaliação de risco e, portanto, incluindo as atividades de avaliação de perigo, várias técnicas de análise de perigo podem ser utilizadas para a identificação/quantificação das causas de uma dada situação de perigo em particular. As técnicas de análise de perigo são divididas em métodos qualitativos e quantitativos.

Os métodos qualitativos mais conhecidos são: Auditoria, Análise Preliminar de Perigos (PHA - *Preliminary Hazard Analysis*), Análise de Operação e Perigo (HAZOP - *Hazard and Operability Analysis*) e a Lista de Verificação (*Checklist*). Os métodos quantitativos incluem a Análise Crítica dos Efeitos dos Modos de Falha (FMECA - *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), a Análise de Árvore de Eventos (ETA - *Event Trees Analysis*) e a Análise de Árvore de Falhas (FTA - *Fault Tree Analysis*). Detalhes destas técnicas podem ser encontrados em (Henley; Kumamoto, 1981); (Montague, 1990); (Leveson, 1995); (Storey, 1996); (Ayyub; Bender, 1999); (Roderick, 2000) e (Belford; Cooke, 2001). A Tabela 2.2 apresenta o resumo das principais técnicas mencionadas.

Tab. 2.2 - Principais Métodos de Análise de Perigo

QUALITATIVOS	Auditoria de Revisão da Segurança Identificar as condições ou procedimentos de operação dos equipamentos que possam conduzir a uma causalidade ou resultar em danos à propriedade ou impactos ambientais.
	Verificação (Checklist) Garantir que a organização atende as práticas normativas.
	Análise de Operação e Perigo (HAZOP) Identificar desvios do sistema e suas causas que possam conduzir a consequências indesejáveis e recomendar ações para reduzir a frequência e/ou consequências dos desvios.
	Análise Preliminar de Perigos (PHA) Identificar e priorizar perigos no desenvolvimento inicial do sistema que conduzem a consequências indesejáveis. Recomendar ações para reduzir a frequência e/ou consequências dos perigos priorizados.
QUANTITATIVOS	Análise Crítica dos Efeitos dos Modos de Falha (FMECA) Identificar os modos de falha de componentes (equipamentos) e os impactos sobre os componentes vizinhos e no sistema. A análise crítica é geralmente expressa em termos de probabilidades ou frequências, tais como número esperado de avarias de um tipo específico durante um milhão de operações executadas em um modo crítico.
	Análise de Árvore de Falha (FTA) Identificar e analisar os perigos e a combinação de falhas dos equipamentos que resultam em acidentes a partir do evento de topo pré-definido. Este método não identifica os perigos.
	Análise de Árvore de Eventos (ETA) Identificar as seqüências de eventos e os resultados em termos de falhas ou sucessos que possam conduzir a acidentes a partir da análise de um dado evento inicial.

A pesquisa deste trabalho na área de Análise de Risco está inserida no âmbito da Avaliação de Risco, especificamente na avaliação do perigo de colisão entre duas aeronaves em operação de aproximação em pistas paralelas. A análise de perigo desta operação é apresentada no capítulo 3 (item 3.3) e a proposta de um modelo de avaliação de perigo é apresentada no capítulo 5 deste trabalho. Deve ser observado que, o conceito adotado neste trabalho com respeito à análise de perigo, está inclusa a avaliação da probabilidade de ocorrência do perigo.

B) Gerenciamento de Risco (*Risk Management*) - processo onde operadores, gerentes, proprietários e órgão regulador responsável tomam decisões com respeito à segurança, mudanças nos regulamentos e o modo de operação do sistema. A base para a tomada de decisão são os dados gerados na avaliação de risco em termos da configuração e dos parâmetros operacionais do sistema. Adicionalmente, podem ser

levados em consideração outros fatores como econômico, político, meio ambiente, regulamentação e produtividade.

Com respeito ao aspecto da regulamentação, Fischhoff et al (1999) assinala que, “a sociedade, pela representação das pressões públicas, tenta prevenir a ocorrência de acidentes, mas infelizmente, as agências governamentais são normalmente reativas no desenvolvimento dos regulamentos adequados. Dessa forma, é extremamente difícil uma resposta à questão ‘*a segurança é segura o suficiente?*’, desde que está diretamente relacionada com as diferentes percepções e compreensão do risco pela sociedade. Infelizmente, freqüentemente é necessária a ocorrência de um desastre para estimular a ação em direção às questões de segurança”.

C) Comunicação de Risco (*Risk Communication*) - processo iterativo de troca de informações e opiniões entre indivíduos, grupos ou instituições de modo a permitir a transmissão das mensagens de risco dos especialistas para os não especialistas (público em geral). Neste processo são apresentadas preocupações, opiniões e reações às mensagens de risco ou aos acordos institucionais e legais.

Segundo Bier (2001-1), são identificados cinco tipos de metas a serem alcançados em um processo de comunicação de risco:

- Construção de um canal de comunicação confiável;
- Aumento da consciência (por exemplo, de um perigo em potencial);
- Educação;
- Busca de acordos (por exemplo, limpeza de um local que indique perigo) e,
- Motivação nas ações (por exemplo, encorajando as pessoas à prática de procedimentos de segurança).

Com relação aos procedimentos a serem executadas pelos tomadores de decisão, as seguintes diretrizes foram identificadas, de modo a permitir uma melhor comunicação das mensagens de risco (Bier, 2001 - 2):

- A apresentação da avaliação de risco deve ser compreensível;
- A aplicabilidade da avaliação de risco com relação à política pública de tomada de decisão deve estar claramente definida;
- A apresentação deve ter credibilidade;

- O relatório de avaliação de risco deve conter sumário claro e breve que inclua tratamento balanceado de todas as questões controversias e relevantes;
- As bases para a escolha das suposições científicas críticas devem ser descritas e discutidas, assim como das soluções apresentadas, quando possível;

Estas diretrizes são geralmente desejáveis em qualquer tipo de comunicação, mas são particularmente importantes na comunicação de risco, desde que o processo de avaliação de risco é geralmente de difícil compreensão, carregados de suposições e muito controversos. Adicionalmente, as seguintes questões são também consideradas na execução da tomada de decisão (Bier, 2001 - 2):

- Requisitos legais;
- Possíveis efeitos adversos de um perigo em particular sendo regulado;
- Opções disponíveis para a redução do risco;
- Confiabilidade da informação sobre a qual a decisão é tomada.

D) Aceitabilidade do Risco (*Risk Acceptability*) – a partir do momento em que o risco previsto em um sistema é quantificado, pode-se iniciar o julgamento se o risco em questão pode ser tolerado ou não, de acordo com o grau de dano que poderá causar. Segundo Profit (1995), em sistemas críticos, são inaceitáveis riscos que sejam caracterizados por consequências indesejáveis e com alta probabilidade de ocorrência. Contudo, pode-se tolerar e assumir riscos nos seguintes casos:

- Aqueles com consequências graves, desde que a probabilidade de ocorrência do risco seja muito baixa, embora o fato em si seja indesejável;
- Aquelas onde as consequências possam ser negligenciadas, desde que a relação *custo-benefício* do programa em análise seja adequada para a eliminação ou, na melhor das hipóteses, minimização dos perigos no processo ou no desenvolvimento do sistema.

Um exemplo ilustrativo da aceitabilidade do risco é apresentado em Otway; Erdmann (1970) apud McCormick (1981) com respeito à aceitabilidade dos níveis de risco individuais cobrindo uma ampla faixa de valores e reproduzido na Tabela 2.3.

Tab. 2.3 - Aceitabilidade dos Níveis de Risco Individuais Fatais Anuais

Nível de Risco Fatal Anual (ano ⁻¹)	Conclusões
10 ⁻³	Nível inaceitável. Acidentes devido a perigos neste nível são difíceis de localizar, sendo necessárias ações imediatas para sua redução ou eliminação.
10 ⁻⁴	As pessoas estão prontas a gastar dinheiro público para controlar o perigo (controle de sinais de trânsito e sistemas contra incêndios). Palavras de ordem de segurança contra acidentes e popularizadas nesta categoria indicam o elemento medo, como “a vida que você pode salvar pode ser a sua”.
10 ⁻⁵	As pessoas ainda reconhecem o perigo. Avisam ou educam as crianças sobre estes perigos (afogamentos, armas de fogo, envenenamento). As pessoas evitam, mas aceitam, por exemplo, o uso do avião como meio de transporte (*). Palavras de ordem de segurança têm um tom de precaução como em “nunca nade sozinho”, “nunca aponte uma arma”, “nunca deixe medicamento ao alcance das crianças”.
10 ⁻⁶	Na média, pouca preocupação por parte das pessoas. As pessoas estão cientes dos acidentes, mas sentem que nunca acontecerão com eles. As fraseologias associadas com este nível de perigo possuem um elemento de resignação como “um raio nunca cai duas vezes no mesmo local”, “um ato de Deus”.

(*) – Vale notar que a pesquisa foi realizada em 1970.

A aceitabilidade do risco é afetada por diversas variáveis. Uma delas diz respeito às atividades *voluntárias* e *involuntárias*. Nas atividades voluntárias, as pessoas se expõem ao risco por conta própria. Exemplos de atividades voluntárias incluem o transporte de passageiros (aéreo, terrestre, fluvial), alimentação, medicamentos, etc. As involuntárias, por outro lado, estão associadas aos danos causados por eventos naturais (raios, terremotos, inundações, etc.). Nas plantas nucleares, embora o risco possa ser voluntariamente assumido por alguns, muitos consideram a proximidade do reator como um risco involuntário. Nesse sentido, a indução de câncer devido à exposição, mesmo a um baixo nível de radiação, pode ter como resultado, um efeito retardado com possibilidade de danos genéticos às futuras gerações. Outra variável diz respeito às tecnologias avançadas, desde que os riscos não são totalmente conhecidos ou compreendidos. (McCormick, 1981).

Uma vez que algumas pessoas são cautelosas a exporem-se aos riscos, outras não se preocupam. Neste contexto, é importante que os critérios de aceitabilidade também sejam diferenciados em relação aos *riscos particulares* (*private risks*) e aos *riscos públicos* (*public risks*). No âmbito dos riscos particulares, as pessoas se expõem e são conhecidas pelos tomadores de decisão. Geralmente, representam indivíduos que vêem algum benefício na aceitação de riscos maiores por conta própria, enquanto que nos riscos públicos, é a sociedade que é exposta (Lind, 2002).

Portanto, a *aceitabilidade do risco* é uma consequência de tomada de decisão, isto é, requer que uma escolha seja feita entre várias alternativas apresentadas, sendo esta escolha dependente de valores, crenças e outros fatores. Nesse sentido, não poderá haver um único número que sirva para todos os propósitos e que expressem a aceitabilidade do risco pela sociedade. No melhor dos casos, pode-se encontrar uma representação que atenda a melhor alternativa para um problema em específico. Dessa forma, a escolha por uma opção é dependente de um conjunto de alternativas inerentes a uma situação específica, das consequências, dos valores e fatos examinados durante o processo de tomada de decisão (Fischhoff et al, 1999).

No Reino Unido, a expressão *aceitabilidade* foi substituída por *tolerabilidade*. Nesta administração, o conceito de tolerabilidade é definido como “*disposição em viver com um perigo potencial emanado de processos e produtos de alta tecnologia*”. A tolerabilidade ao risco implica na condição dos julgamentos que são feitos acerca dos riscos involuntários que afetam tanto a sociedade como o indivíduo, apesar de se reconhecer que os riscos nunca são completamente aceitos. A aceitabilidade pela sociedade das propostas de desenvolvimento pelas indústrias, incluindo aquelas de alta tecnologia (usinas nucleares e biotecnologia), depende de uma combinação de fatores que incluem acordos, confiança, consultas e negociações (Kemp, 1991).

Um modelo de determinação da aceitabilidade do risco é denominado ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), cujo princípio se resume em reduzir o nível de risco de um sistema a um valor pequeno, desde que a relação entre o ganho e o investimento seja aceitável. Segundo a *International Electrotechnical Commission* (IEC 1508-5) 1997, o modelo ALARP pode ser utilizado para regular riscos emanados de processos industriais e indicam:

- (a) O risco é tão grande que não deve ser tolerado, ou
- (b) O risco é ou tornou-se tão pequeno, tornando-se insignificante, ou
- (c) O risco está entre os dois estados especificados nos itens (a) e (b), tendo sido reduzido ao mais baixo nível praticável, tendo em vista os benefícios resultantes de sua aceitação, além dos custos de qualquer redução adicional.

No item (c), o princípio ALARP requer que qualquer risco deve ser reduzido a um nível que seja tão baixo quanto razoavelmente praticável. Se o risco estiver entre os dois extremos (região inaceitável e região amplamente aceitável) e caso o princípio ALARP tenha sido aplicado, o risco resultante é um risco tolerável para aquela aplicação em específico.

Figura 2.4 ilustra as regiões de risco do modelo ALARP.

Fig. 2.4 – Risco Tolerável e ALARP

E) **Percepção do Risco** (*Risk Perception*) – define o processo como as pessoas percebem e assimilam as mensagens de risco, como a mídia a traduz e como governos, indústrias e outras organizações correlatas possam melhor transmitir essas mensagens à sociedade, desde que podem conter informações de natureza relacionada a perigos potenciais (Powel, 1996). Esta área de estudo tem origem nas primeiras discussões para a instalação de plantas nucleares na década de 60.

A maioria dos debates sobre a percepção do risco nasceu da dicotomia entre as medições do risco objetivo e subjetivo. A medida objetiva do risco tem dimensões físicas e mensuráveis, por exemplo, quantidades estatísticas como “*número de mortes por milhão*” e “*expectativa de perda de vida*”.

A medida subjetiva, por outro lado, envolve tipicamente preferências expressas ou reveladas. A preferência revelada é baseada na aceitação do risco real ou no comportamento de como o risco é aceito. A preferência expressa é baseada em declarações do tipo, “*aquilo que alguém gostaria de aceitar*”, em oposição à “*aquilo que alguém de fato aceita*”. Neste contexto, vários estudos têm sido realizados objetivando identificar a dimensão de como as pessoas percebem os riscos. Uma das formas é utilizar-se de uma lista de perigos (acidentes nucleares, incêndios, andar de carro/bicicleta, etc.) e uma lista de qualidades (natural/feita pelo homem, específico/não específico, local específico/não específico, mais/menos perigoso, etc.) e realizar uma pesquisa junto ao público. Com os resultados tabulados, determinar a dimensionalidade do problema (Bedford; Cooke, 2001).

Uma variedade de fatores pode influenciar a percepção do risco pelas pessoas ou sociedade. Nesse sentido, diversas abordagens e metodologias têm sido desenvolvidas para a compreensão de como as pessoas percebem os riscos. Algumas dessas metodologias podem ser vistas em (McCormick, 1981); (Johnson, 1992) e (Sjoberg, 2000). A compreensão desse processo permitirá que a agência ou órgão regulador responsável tenha as ferramentas necessárias para antecipar e a modelar as informações de risco a serem transmitidas de forma adequada, objetivando melhorar a aceitabilidade do risco pelo público.

2.3.4. Fontes de Risco

As fontes de risco de sistemas computadorizados podem originar-se nos vários estágios do desenvolvimento do sistema, durante a operação comercial e pela própria utilização do sistema.

Vale ressaltar que, segundo a *International Electrotechnical Commission* (IEC) 2002, “os atuais sistemas elétricos, eletrônicos ou eletrônicos programáveis estão mais complexos, tornando impossível na prática, a completa determinação de todos os modos de falhas ou no teste de todos os possíveis comportamentos do sistema. Como consequência, são imensas as dificuldades na predição do desempenho do sistema com respeito à segurança”.

Durante o desenvolvimento de sistemas computadorizados, as seguintes fontes de risco devem ser observadas (Neumann, 1995):

- Concepção do sistema: aplicação inapropriada da tecnologia.
- Definição dos requisitos de forma errônea, incompletos ou inconsistentes;
- Projeto do sistema: imperfeição ou conceitos errados relativo ao projeto ou na especificação, em termos de hardware ou software;
- Implementação de hardware e software: falhas na fabricação de *chips*, erros de cabeamento ou *bugs* em programas;
- Ferramentas de sistema que possam conduzir a erros, como linguagens de programação pobres, compiladores ou depuradores defeituosos;
- Análise de sistema: análises com base em falsas suposições com respeito ao ambiente de operação do equipamento como também sob o aspecto do operador humano;
- Análise do projeto: utilização de modelos não apropriados ou imperfeitos;
- Análise da implementação: testes realizados de forma incompleta ou errônea. Inclui erros de depuração no software.

Durante a operação e utilização do sistema, as fontes de risco originam-se de diversas formas. Nesta fase são adicionados os fatores humanos e externos. Os fatores externos incluem o meio ambiente, a infra-estrutura, o mau funcionamento do hardware e software, as limitações do fator humano, entre outros.

3. RISCOS NO CONTEXTO DA NAVEGAÇÃO AÉREA

Neste capítulo são introduzidos os fundamentos básicos do sistema de controle de tráfego aéreo, cujo contexto é motivação desta pesquisa. Uma breve conceituação dos futuros sistemas de navegação aérea também é discutida. Em seguida, é apresentado o cenário geral onde é aplicado este trabalho; na literatura técnica é conhecido como operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas ou *Closely Spaced Parallel Approaches* (CSPA).

3.1. O Sistema de Controle de Tráfego Aéreo

Nos tópicos a seguir, são apresentados os conceitos básicos do sistema de controle de tráfego aéreo e sua evolução. Os conceitos, as restrições e alguns modelos de análise de colisão entre aeronaves envolvidas na operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas (CSPA) são também abordados.

3.1.1. Introdução

Antes da década de 30, pouco se considerava quanto à necessidade do estabelecimento de um sistema organizado para gerenciar o tráfego aéreo, desde que as aeronaves eram relativamente lentas e os vôos se restringiam à navegação durante o dia e em ótimas condições de visibilidade. Vôos que se utilizam desse procedimento são denominados de VFR (*Visual Flight Rules*). Esta prática é conhecida pelos pilotos como “*see and be seen*” como principal método para evitar colisões entre aeronaves. Porém, com o desenvolvimento do setor, o tráfego aéreo noturno também se estabelece rotineiramente. Neste caso, como auxílios à navegação, novos instrumentos foram incorporados às aeronaves (*cockpit*), além de outros implementados em solo para referência aos pilotos. Estes instrumentos permitiram aos pilotos a executarem todas as fases de um vôo em condições meteorológicas adversas daquelas previstas nas regras VFR (*Visual Flight Rules*), sendo conhecidas como IFR (*Instrument Flight Rules*) (Nolan, 1998).

Nos horários noturnos e em condições de alto tráfego nas vizinhanças dos aeroportos, a necessidade da função de um controlador de tráfego aéreo tornou-se inevitável,

sendo de sua responsabilidade, a separação entre as aeronaves, a condução das aproximações/aterissagens, além do taxiamento e decolagens. Estas funções estão inseridas no âmbito do Controle de Tráfego Aéreo ou ATC (*Air Traffic Control*).

O Gerenciamento do Tráfego Aéreo, ATM (*Air Traffic Management*), compreende todo o processo de gestão, de organização, de utilização e de controle de recursos para viabilizar o melhor desempenho do tráfego aéreo do espaço controlado, sujeito às características das instalações aeroportuárias, dos auxílios à navegação, das aeronaves, das condições de vôos, da previsão dos movimentos, da evolução do tráfego, entre outras. Em linhas gerais, tem como objetivo permitir às operadoras cumprirem seus tempos de vôo, pousos e decolagens planejados e aderirem a perfis de vôos com um mínimo de constrangimento, sem o comprometimento dos níveis de segurança acordados (Machado, 2000).

Deve ser ressaltado que, em termos de responsabilidade, o piloto em comando tem a autoridade decisória em todos os aspectos relacionados à operação da aeronave, sendo de sua responsabilidade que as operações sejam realizadas de acordo com as regras predefinidas, podendo delas se desviar em situações absolutamente necessárias no atendimento às exigências de segurança (Sales, 2002).

Genericamente, o sistema de controle de tráfego aéreo abrange seis fases de operação como ilustra a Figura 3.1. A fase 1 indica o espaço aéreo e o plano de vôo, abrangendo também as outras cinco fases; a fase 2 é subtendida pela pista do aeroporto, a fase 3 o processo de aterrissagem e decolagem e assim sucessivamente até a fase de cruzeiro (*en route*) caracterizado pela fase 6 (Boeing, 1997).

Fig. 3.1 - Fases de Operação no Espaço Aéreo

O sistema de controle de tráfego aéreo é organizado de forma a disponibilizar diversos serviços e facilidades que incluem (Perry, 1997):

- Monitoração das aeronaves no solo e autorização de pousos/decolagens pela torre de controle;
- Controle de ascensão e aproximação das aeronaves de/para aeroportos pelos radares terminais de controle de aproximação;
- Controle das aeronaves em espaços setorizados e em altas altitudes entre aeroportos pelos diversos centros de controle ao longo das aerovias. Cada controlador de tráfego aéreo é responsável por um setor do espaço aéreo da ordem de vários milhares de pés de altitude e desde 20 a 200 milhas náuticas de extensão (1milha náutica = 6.080 pés = 1.853 metros).

O espaço aéreo de um país é dividido em classes com requisitos específicos e regras de operação distintas para cada classe do espaço aéreo, sendo definidas pela Organização da Aviação Civil Internacional, ICAO (*International Civil Aviation Organization*). A ICAO representa o órgão regulador da aviação civil internacional, cuja competência inclui a promoção, o incentivo e o estabelecimento de padrões para a aviação civil internacional. Idealizado na convenção de Chicago em 1944 e instituído em outubro de 1947, tem como sede, a cidade de Montreal no Canadá.

Esta classificação tem por objetivo prover uma melhor flexibilidade ao piloto e, de forma apropriada, para cada tipo de operação e densidade de tráfego. Em outras palavras, permite prover a separação mínima entre aeronaves e um controle ativo em áreas densas ou em operações envolvendo aeronaves em alta velocidade. Em áreas de baixo tráfego e condições meteorológicas aceitáveis, o próprio piloto pode prover a separação necessária entre as aeronaves (Nolan, 1998).

No Brasil, seis anos após a criação da aviação militar em 1933, o aumento das atividades nos serviços do correio aéreo exigiu a instalação das primeiras estações meteorológicas no Rio de Janeiro, Porto Alegre e Curitiba para apoio a essas operações, sendo considerado como marco inicial do serviço de proteção ao voo no Brasil. A evolução dessas instalações de suporte é hoje conhecida como CINDACTA (Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Tráfego Aéreo) localizado em

Brasília, Recife e Curitiba. Criado em 1977, o CINDACTA funciona como órgão regional da DEPV (Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Vôo) dividindo-se em dois centros denominados de Centro de Controle de Área e Centro de Operações Militares. O serviço de navegação aérea no Brasil é de responsabilidade do Ministério da Aeronáutica, sendo representado pela Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Vôo (DEPV), cuja missão compreende, entre outras, a gerência dos requisitos de controle do tráfego aéreo brasileiro, defesa do espaço aéreo, pesquisa e desenvolvimento de produtos de interesse na proteção ao vôo (Siewerdt, 2000).

Segundo Weigang (1994) e Sales (2002), o espaço aéreo brasileiro é dividido em:

- **Espaço aéreo não controlado:** nestes espaços, os próprios pilotos são responsáveis pela separação entre as aeronaves. Portanto, o serviço de separação entre aeronaves não é de responsabilidade do ATC (*Air Traffic Control*), independente das condições meteorológicas.
- **Espaço aéreo controlado:** corresponde aos espaços aéreos onde se prestam os serviços de controle de tráfego aéreo ATC (*Air Traffic Control*). São divididos em cinco regiões e administrados pelo DEPV por meio de centros denominados de SRPV (Serviços Regionais de Proteção ao Vôo) e pelo CINDACTA (Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Tráfego Aéreo). O SRPV corresponde aos órgãos regionais da DEPV, cuja finalidade é facilitar as tramitações referentes à proteção ao vôo.
- **Espaço aéreo condicionado:** aquele restrito à circulação aérea geral e de dimensões definidas, constituindo-se de áreas proibidas (vôo não permitido em áreas próximas a refinarias, fábricas de explosivos, usinas hidroelétricas e áreas de segurança nacional), restritas (situações de exercício de tiro, lançamento de foguetes e pára-quedismo) e perigosas (áreas onde existam riscos em potencial como no treinamento de aeronaves civis). Os limites são indicados nas cartas aeronáuticas e manuais da DEPV, sendo estabelecido em caráter temporário ou permanente.

O serviço de tráfego aéreo, ATS (*Air Traffic Services*), é prestado em todo espaço aéreo brasileiro, sendo divididos em ATC (Serviço de Controle de Tráfego Aéreo), FIS (Serviço de Informação ao Vôo) e AS (Serviço de Alerta).

O serviço de controle de tráfego aéreo (ATC) é a atividade mais importante para manter ordenada e contínua o fluxo de tráfego aéreo nos espaços aéreos controlados, onde são emitidas autorizações de controle. São três os tipos de serviços de controle de tráfego aéreo: Centro de Controle de Aeródromo (TWR)^(*), Centro de Controle de Aproximação (APP)^(**) e Centro de Controle de Área (ACC)^(***).

O serviço FIS (Serviço de Informação ao Vôo) tem a finalidade de prover informações úteis, objetivando a execução segura e eficiente de vôos a todas as aeronaves que tenham dado conhecimento de seu vôo a um órgão ATS (*Air Traffic Services*). Estas informações dizem respeito às condições meteorológicas significativas da rota e aeródromos, alterações em aeródromos, auxílios à navegação e serviços de informação do tráfego aéreo, sendo prestado por todos os órgãos ATS.

O serviço AS (Serviço de Alerta) é prestado a toda aeronave que tenha dado conhecimento de seu vôo a um órgão ATS, sendo realizado pelo órgão ATS do aeródromo de destino; em rota, a responsabilidade pelo serviço cabe ao ACC (Centro de Controle de Área).

(*): Também denominado ATCT (*Airport Traffic Control Towers*), responsável pelo controle de movimentos de aeronaves no solo e nas vizinhanças do aeroporto.

(**): Disponibilizam serviços de controle de tráfego aéreo em termos de aterrissagens e decolagens de aeronaves sob regras VFR/IFR (*Visual Flight Rules/Instrumental Flight Rules*) e, ocasionalmente, para tráfegos em rota. Em alguns aeroportos não servidos pela facilidade de controle de aproximação APP, o ARTCC (*Air Route Traffic Control Center*) pode prover o serviço de forma limitada de controle de aproximação.

(***): Na definição pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*), ACC (*Area Control Center*) é uma facilidade do controle de tráfego aéreo ATC (*Air Traffic Control*) que provê serviços às aeronaves sobre regras IFR (*Instrument Flight Rules*) durante a fase de vôo de cruzeiro (*en route*). O equivalente americano é o ARTCC (*Air Route Traffic Control Center*).

3.1.2. Futuros Sistemas de Navegação Aérea

A partir do início da década de 80, nos principais países desenvolvidos, uma carga progressiva de trabalho foi imposta aos centros de controle de tráfego aéreo como consequência do aumento no volume do tráfego aéreo de passageiros. Nesse período, no Brasil, o aumento anual no fluxo de passageiros no Aeroporto Internacional de Guarulhos cresceu a uma taxa média de 7% a.a. (Weigang, 1994).

Considerando o período de 1992-2010, as previsões para o mercado mundial, incluindo a América do Norte, Europa, Ásia-Pacífico, América Latina e África, indicavam um crescimento médio em torno de 5% no tráfego anual de passageiros (Galotti, 1998). Neste contexto, Perry (1997) assinala que, “em meados do ano de 2015, caso o sistema de transporte aéreo americano não acuse nenhuma modificação relevante com respeito aos processos e tecnologias atuais utilizados na aviação, a ocorrência de desastres aéreos e de grandes proporções poderá se tornar uma rotina com frequência de ocorrência a cada sete ou dez dias”.

Portanto, a capacidade da atual plataforma utilizada no controle de tráfego aéreo poderá exaurir-se em alguns anos, caso a taxa média de crescimento no transporte de passageiros mantenha-se nesse patamar. Atualmente, a tendência de crescimento observada no setor foi, de certa forma, interrompida em função do atentado terrorista “11 de setembro” nos EUA e, em grande parte, pela situação econômica recessiva em que se encontram os principais países desenvolvidos.

Vários fatores limitantes na atual plataforma podem acelerar a saturação do sistema. Esses fatores incluem a utilização ineficiente do espaço aéreo (rotas pré-determinadas), uso de equipamentos obsoletos em operação nos centros de controle de tráfego aéreo, comunicação restrita e congestionada (voz) entre aeronaves e o centro de controle (ATC) e pouca flexibilidade na navegação através do uso de estações transmissoras fixas, VOR^(*), em terra (Tomlin; Pappas; Sastry, 1998).

(*) VOR (*VHF Omni directional Range*): sistema de navegação em terra para a transmissão de cursos de navegação. Cada VOR é designado com uma frequência entre 108,10 e 117,90 MHz.

Dessa forma, com a saturação da atual plataforma, é possível que os requisitos mínimos de segurança, em situações onde o tráfego aéreo seja demasiadamente alto, sejam comprometidos. Outrossim, o aumento de gastos extras com combustíveis nos circuitos de espera e de tempo para pousos e decolagens pode se tornar rotina, gerando como conseqüências, atrasos e insatisfação por parte dos usuários finais. Nesse contexto, objetivando o atendimento da demanda prevista no futuro próximo, torna-se imperativo o desenvolvimento e implementação de uma nova plataforma para o setor aéreo de transporte de passageiros.

Como resposta a este desafio, em 5 de setembro de 1991, 450 representantes de 85 administrações e 13 organizações internacionais aprovaram no âmbito da ICAO (*International Civil Aviation Organization*), o conceito dos Futuros Sistemas de Navegação Aérea (FANS - *Future Air Navigation System*), cuja premissa básica é o atendimento às necessidades da comunidade da aviação civil para o próximo século, conhecido como CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management*), envolvendo um conjunto complexo de tecnologias e inter-relacionadas e dependentes principalmente do uso de satélites (Galloti, 1998).

Portanto, o sistema CNS/ATM deverá ser implementado para superar as limitações do sistema atual e satisfazer a evolução da demanda do tráfego aéreo e dos requisitos dos usuários em termos de eficiência e economia, mantendo ou melhorando os níveis de segurança existentes (ICAO, 1994).

Como principais objetivos, a introdução do sistema CNS/ATM inclui diminuir riscos de conflito e colisão mesmo nas situações onde sejam acomodados uma grande variedade e tipos de aeronaves no mesmo espaço aéreo, melhorar a provisão de informações aos usuários (condições meteorológicas, tráfego situacional e outras facilidades), permitir uma gerência flexível do espaço aéreo, utilizar eficientemente as aerovias, aumentar o envolvimento do diálogo ar-terra para melhorar e auxiliar a tomada de decisão por meio do uso de enlace de dados digitais (*data-links*) e criar, dentro do possível, um espaço aéreo contínuo onde as fronteiras sejam transparentes aos seus usuários (Galloti, 1998).

3.2. Operação de Aproximação em Pistas de Aterrissagem Paralelas

Neste tópico é apresentado o cenário geral onde é aplicado este trabalho de pesquisa. Na literatura técnica, este cenário é conhecido como operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas (CSPA - *Closely Spaced Parallel Approaches*).

3.2.1 Conceituação

Excluindo-se eventos como o terrorismo no setor aéreo de transporte e alguns percalços na economia mundial, pesquisas recentes de mercado indicavam, invariavelmente, um aumento no tráfego aéreo para as próximas décadas.

Neste contexto, segundo Houck; Powell (2000), os principais aeroportos em todo o mundo necessitarão de meios adequados para o tratamento do tráfego aéreo excedente, que poderá duplicar-se nas próximas duas décadas. Atualmente, diversos aeroportos operam no limite de sua capacidade em algumas horas do dia, de forma que, um aumento na sua capacidade, será de suma importância para suportar o crescimento esperado do tráfego aéreo.

Esta demanda excedente pode ser atendida pela construção de novos aeroportos, adição de novas pistas ou aumentando-se a capacidade das pistas existentes em termos do fluxo de decolagens e aterrissagens. Contudo, a construção de novos aeroportos como também a adição de pistas adicionais as existentes são onerosas e de difícil alteração uma vez construídas. Essas soluções podem incorrer em fortes impactos ao meio ambiente e nas comunidades vizinhas. Portanto, a maximização da taxa de aterrissagem/decolagem das pistas existentes e que seja independente das condições meteorológicas, é uma alternativa para o atendimento do tráfego aéreo excedente, desde que satisfaçam critérios mínimos de segurança.

Diversos aeroportos possuem pistas de aterrissagens paralelas, cujo espaçamento entre as linhas centrais das pistas variam de um aeroporto a outro. Nesses aeroportos, existem duas ou mais taxas de uso das pistas: uma taxa ótima baseada em ótimas condições meteorológicas, e uma taxa reduzida, em condições de tempo adversas (baixa visibilidade, ventos não favoráveis ou elevadas precipitações). Os fatores

subjacentes que afetam a operação de aproximação nos aeroportos em períodos de baixa visibilidade são (FAA, 2001):

- Falta de procedimento(s) na operação de aproximação por instrumentos disponíveis nos aeroportos e,
- Inabilidade em maximizar o uso das pistas de aterrissagem paralelas quando a separação visual não possa mais ser aplicada.

Portanto, nesses aeroportos, é interessante que a taxa de utilização das pistas de aterrissagem paralelas seja próxima à taxa ótima e, além disso, seja independente das condições meteorológicas. Vale observar que, a taxa de uso das pistas a que se refere o texto é a taxa de aterrissagens e não a taxa de decolagens. Nas operações de aproximação, os eventos e os controles associados que podem induzir a ocorrência de estados perigosos (colisão entre aeronaves e obstáculos) são mais significativos quando comparados às operações de decolagens.

Segundo Haines, Swedish (1981); Houck et al (1999) e Bone et al (2001), a operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas (*Closely Spaced Parallel Approaches* - CSPA) corresponde ao processo onde duas aeronaves realizam conjuntamente e, muito próximas umas das outras, a fase de aproximação em pistas de aterrissagens paralelas que estejam separadas de 4.300 pés (1310,6m) ou menos. Como regra geral, aterrissagens durante boas condições meteorológicas ou VMC (*Visual Meteorological Conditions*), a aproximação pode ser conduzida por meio do critério “*see and be seen*”, isto é, sob regras VFR (*Visual Flight Rules*).

Nas aproximações durante boas condições meteorológicas, VMC (*Visual Meteorological Conditions*), a responsabilidade de separação entre aeronaves em uma aterrissagem padrão é transferida do controlador de tráfego aéreo para o piloto, devendo o piloto reportar ao controle do aeroporto ou a aeronave precedente, a condução da aproximação visual. Nestas condições, após a aceitação da aproximação visual, o piloto será responsável pela manutenção de um intervalo de tempo de aproximação seguro como também de uma separação adequada, entre as aeronaves, devido ao efeito de turbulências geradas pela aeronave. Aproximações visuais

simultâneas em pistas de aterrissagem paralelas podem ser conduzidas se o espaçamento entre as linhas centrais das pistas seja de pelo menos 700 pés (213,4m).

Sob condições meteorológicas por instrumento, IMC (*Instrument Meteorological Conditions*) e regras IFR (*Instrument Flight Rules*), o controlador de tráfego aéreo é responsável pela separação segura entre as aeronaves. Atualmente, as pistas devem estar separadas de pelo menos 4.300 pés (1310,6m) nas operações de aproximação paralelas e independentes (aterrissagem simultânea de duas aeronaves).

Caso a separação das pistas paralelas esteja entre 4.300 pés (1310,6m) e 2.500 pés (762m), a operação de aproximação é denominada de “*aproximação dependente*”, com restrições na separação diagonal entre as aeronaves que estejam aterrissando nas diferentes pistas (3 milhas náuticas, caso a separação entre as pistas esteja entre 2.500 a 3.000 pés e 2 milhas náuticas para 3.000 a 4.300 pés de espaçamento).

Aeroportos com pistas paralelas separadas de menos de 2.500 pés (762m) estão sujeitas ao perigo de turbulências devido aos vórtices (*wake vortex*)^(*). Neste caso, as pistas de aterrissagem paralelas são limitadas essencialmente às operações em pista simples durante condições IMC (*Instrument Meteorological Conditions*).

A Figura 3.2 ilustra os conceitos básicos da operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas apresentados anteriormente (Buley; Corwin, 1998).

(*): Vórtices ou “*wake vortex*” são turbulências produzidas pelas pontas das asas, cuja intensidade depende das características da aeronave em termos do peso, envergadura e forma da asa, ângulo de ataque e certas condições atmosféricas (direção e velocidade do vento). O vórtice (cada asa gera o seu próprio vórtice) é o resultado da pressão diferencial entre a parte inferior (alta pressão) e superior (baixa pressão) da superfície da asa, sendo criado no momento da decolagem (instante que deixa o solo) e cancelado na aterrissagem (instante que atinge o solo). Os vórtices gerados por uma aeronave são extremamente perigosos e podem descontrolar totalmente outra aeronave que esteja atrás, desde que a velocidade de rotação do vórtice pode chegar a 133 nós ou 246 km/hora. Além disso, vórtices próximos ao solo iniciam movimentação horizontal com velocidade de aproximadamente de 5 nós e, dependendo das condições do vento (velocidade e direção), podem atingir a outra pista paralela que esteja separada a menos de 2.500 pés (762m) (Krause, 1996); (Nolan, 1998).

Fig. 3.2 - Padrões de Separação (VFR x IFR)

Porém, aeroportos equipados com radares mais sofisticados denominados PRMs (*Precision Runway Monitor*) ^(***), a restrição de 4.300 pés (1310,6m) é baixada para 3.400 pés (1036,3m). Caso estes critérios não sejam satisfeitos (separação entre pistas, disponibilidade de radares sofisticados e condições meteorológicas adequadas), os critérios de separação longitudinal serão aplicados e gerenciados pelos controladores de tráfego aéreo por questões de segurança. Portanto, em pistas de aterrissagem paralelas não equipadas com sistemas PRMs (*Precision Runway Monitor*) ou que estejam próximas a 3.400 pés (1036,3m), deverá ser utilizada a operação de aproximação dependente (com separação diagonal). Pistas paralelas e próximas a 2.500 pés (762m) de separação, as duas pistas são tratadas como pista única. (Nolan 1998), (Landry; Nickles, 1999) e (Morrow-Magyarits; Ozmore 1999).

Os conceitos ora apresentados referem-se às operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas. Porém, existem também aeroportos com pistas simples, triplas e convergentes (combinação de duas pistas convergentes).

(***) PRM (*Precision Runway Monitor*) são sistemas que permitem operações simultâneas e independentes de aeronaves sob regras IFR (*Instrument Flight Rules*) em aeroportos com pistas de aproximação paralelas espaçadas acima de 3.400 pés (1036,3m). Possuem varreduras ou taxa de atualização de dados de 1 segundo em contraposição aos radares de vigilância convencionais ASR (*Airport Surveillance Radar*) com taxa de atualização radar de 4,8 segundos (FAA, 1997).

Aeroportos que permitem operações de aproximação independentes em pistas convergentes são denominados de SCIA (*Simultaneous Converging Instrument Approaches*). A operação de aproximação dependente é denominada de DCIA (*Dependent Converging Instrument Approaches*). Nesta última configuração, um dos perigos mais conhecidos é a possibilidade de colisão em pleno vôo, devido à emissão de dupla autorização (Blom; Klompstra; Bakker, 2001).

A Figura 3.3 ilustra exemplo de pistas convergentes (pistas denominadas de 19R e 22) existentes no aeroporto de Schiphol (*) em Amsterdã, na Holanda.

Fig. 3.3 – Geometria de Pistas Convergentes

Como ilustração, a Tabela 3.1 apresenta a configuração das pistas (paralelas e convergentes) de alguns aeroportos nos EUA (Buley; Corwin, 1998).

Tab. 3.1 – Principais Aeroportos nos EUA

aeroporto	denominação (**)	espaçamento (pés/metro)
Fort Lauderdale	9L/9R	4.000 (1.219,2)
Detroit	3L/3C	3.800 (1.158,2)
Phoenix	8L/8R	3.565 (1.086,6)
Memphis	18L/18R	3.400 (1.036,3)
Minneapolis	30L/30R	3.380 (1.030,2)
Portland	10L/10R	3.100 (944,9)
Kennedy	4L/4R	3.000 (914,4)
Indianápolis	5L/5R	2.525 (769,6)
Detroit	3C/3R	2.000 (609,6)
Orlando	18L/18R	1.600 (487,7)
Boston	4L/4R	1.500 (457,2)
Philadelphia	9L/9R	1.400 (426,7)
St. Louis	12L/12R	1.300 (396,2)
Dallas-Ft. Worth	17L/17R 18L/18R	1.200 (365,8)
Atlanta	8L/8R 9L/9R	1.000 (304,8)
Las Vegas	7L/7R	1.000 (304,8)
Newark	4L/4R	900 (274,3)
Seattle	16L/16R	800 (243,8)

(*): É o único aeroporto internacional localizado abaixo do nível do mar.

(**): R – Right, L – Left e C – Convergent.

No Brasil, os principais aeroportos com pistas de aproximação paralelas (não incluindo aeroportos militares) são aqueles apresentados na Tabela 3.2.

Tab. 3.2 – Pistas de Aproximação Paralelas no Brasil ^(*)

aeroporto	espaçamento (pés/metro)
Guarulhos	1.230 (375)
Congonhas	712 (217)
Natal	2.494 (760)
Santos Dumont	246 (75)

3.2.2. Elementos de Análise das Pistas de Aterrissagem Paralelas

Como descrito no item anterior, a operação de aproximação independente em pistas de aterrissagem paralelas sob condições meteorológicas por instrumento, IMC (*Instrument Meteorological Conditions*), pode atualmente ser conduzida em pistas paralelas tão próximas quanto 3.400 pés (1036,3m) pela utilização de sistemas radares mais sofisticados denominados de PRMs (*Precision Runway Monitor*).

O monitoramento da aeronave em aproximação pelo controlador de tráfego aéreo é sempre relativo à Zona de Não Transgressão, NTZ (*No Transgression Zone*) entre as pistas paralelas, de modo que, quando uma das aeronaves (aeronave intrusa), extraviar-se em direção à zona de não transgressão NTZ, instruções adequadas a partir do controlador de tráfego aéreo devem ser emitidas para a prevenção de possíveis conflitos. A Figura 3.4 ilustra esse conceito.

Fig. 3.4 - Aproximação Paralela com Zona de Não Transgressão (NTZ)

(*): Informalmente, segundo Siewerdt, E. – Atech, Tecnologias Críticas.

Uma das principais limitações do sistema PRM (*Precision Runway Monitor*), refere-se aos atrasos significativos que podem ocorrer entre o instante que a aeronave intrusa inicia a transgressão (extravio de sua trajetória em direção à zona de não transgressão, NTZ) e o instante que o controlador de tráfego aéreo observa esta transgressão e tenha condições de emitir as instruções necessárias de alerta na prevenção do conflito. Nessas condições, para prover uma adequada segurança, uma separação relativamente extensa da ordem de 2.000 pés (609,6m) deve ser atribuída à zona de não transgressão, NTZ (Carpenter; Kuchar, 1997).

Os atrasos envolvidos em uma operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas são ilustrados na Figura 3.5. Nesta análise, assume-se que a aeronave intrusa continua em sua trajetória, apesar dos alertas emitidos pelo controlador de tráfego aéreo (Shepherd et al, 1997).

Fig. 3.5 – Atrasos na Operação de Aproximação em Pistas Paralelas

Devido à potencialidade desses atrasos serem grandes, o uso do sistema PRM (*Precision Runway Monitor*) tem sido estimado como incapaz na resolução de aproximadamente 1 em cada 250 casos de *blunders* (definido como uma mudança repentina de 30° pela aeronave intrusa em direção à trajetória da outra aeronave). Caso a distância entre as pistas paralelas sejam menor que 3.400 pés (1.036,3m), o

sistema PRM (*Precision Runway Monitor*) é incapaz de prover níveis adequados de segurança, sem a produção de um número excessivo de falsos alarmes. Porém, um sistema de alerta embarcado na aeronave, teria a princípio, o benefício de eliminar muito desses atrasos pelo envio do alerta diretamente ao piloto. Sistemas de alerta embarcado nas aeronaves como o TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*)^(*) produzem taxas inaceitáveis de falsos alarmes em pistas paralelas com espaçamento próximo a 3.000 pés, pois foram projetados para rotas de cruzeiro. Dessa forma, é de suma importância que uma lógica de alerta adequada e especializada seja embarcada nas aeronaves, caso operações de aproximação independentes e simultâneas em pistas paralelas espaçadas a menos de 3.400 pés sejam conduzidas em ambientes IMC (*Instrument Meteorological Conditions*) (Carpenter; Kuchar, 1997).

A tecnologia mais recente para uso futuro nas operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas é denominada AILS (*Airborne Information for Lateral Spacing*) embarcada nas aeronaves. Este equipamento é baseado no sistema de posicionamento por satélites GPS (*Global Positioning System*), aliado às técnicas de refinamento do sinal do satélite denominada de DGPS (*Differential GPS*)^(**). O sistema AILS consiste de uma tela especial de navegação e um algoritmo de sinalização de alerta ao piloto, caso a aeronave, em operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas, divergir da trajetória de voo intencionada. Este sistema permite a operação de aproximação independente e simultânea, em condições IMC (*Instrument Meteorological Conditions*), em pistas de aterrissagem paralelas espaçadas a partir de 2.500 pés (762m). O sistema AILS embarcado nas aeronaves tem a vantagem de eliminar atrasos de comunicação entre o controlador de tráfego aéreo e o piloto e o tempo de uso dos canais de comunicação (Wickens et al, 1998); (NASA, 2000) e (Muñoz; Carreño, 2000).

(*): Sistema que provê informações de alerta ao piloto na prevenção de colisões no ar (*midair collisions*).

(**): Técnica utilizada para aumentar a precisão na localização de aeronaves através do uso de sinais de satélite GPS (*Global Positioning System*). Esta técnica se baseia na utilização de um receptor GPS com localização conhecida. A partir desse conhecimento, pode-se determinar os erros contidos nos sinais enviados pelos satélites e transmitir esses erros através de uma mensagem para outros receptores GPS para a correção de suas posições.

3.3. Análise de Perigo em Pistas de Aterrissagem Paralelas

A análise da separação adequada entre as aeronaves pode ser aplicada independentemente em pelo menos 3 domínios: oceânico, em rota e terminal (nas vizinhanças do aeroporto). Os tipos de separação entre as aeronaves nestes domínios são ilustrados na Tabela 3.3 (Shepherd et al, 1997).

Tab. 3.3 - Tipos de Domínios e Cenários

domínio	cenário	tipo de separação
oceânico	rastreamento lateral	lateral
		longitudinal (<i>in-trail</i>)
em rota		lateral
terminal	aterressagem - pistas paralelas	longitudinal (<i>in-trail</i>)
	aterressagem - pista simples	
	decolagem e manobra	

O risco da perda de separação entre as aeronaves pode ser visualizado como resultado da interação entre os diversos componentes que constituem o sistema aéreo. Os principais componentes são: desempenho da aeronave, a exposição e a intervenção. O desempenho da aeronave refere-se à sua habilidade em manter a conformidade com a operação normal prevista. A componente exposição computa o risco que uma aeronave oferece a outros tráfegos de acordo com a configuração da rota, densidade de tráfego ou de perigos como turbulências e obstruções. A última componente, a intervenção, tem a função de atenuar os riscos e depende do desempenho dos equipamentos de vigilância, do controle de tráfego aéreo (ATC), do piloto e dos meios de comunicação. A eficácia desta componente está relacionada ao momento em que é executada a intervenção, devido aos atrasos inerentes deste processo (Shepherd et al, 1997).

Observação: Vale ressaltar que na Tabela 3.3, com respeito aos domínios oceânico e em rota, pode-se considerar também a separação vertical entre as aeronaves como parâmetro de avaliação no processo de análise de risco.

A seguir é apresentado o resultado da análise de perigo, segundo Cassel; Smith; Shepherd (2003) e Shepherd et al (1997), aplicado na operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas. A técnica de análise de perigo utilizada pelos autores é a Análise de Árvore de Falhas. O principal perigo nesta operação de aproximação corresponde ao desvio da trajetória de uma das aeronaves em direção à trajetória da aeronave adjacente. Na literatura, a aeronave intrusa é denominada de *blunder* ^(*) e, a outra que executará o procedimento de escape, de aeronave de referência ou *evader*. A Figura 3.6 ilustra esta análise.

A árvore de falha apresentada é constituída de três tipos de conflitos:

- (a) Perigo de colisão entre as duas aeronaves (*evader* com a *blunder*) na operação de aproximação nas pistas paralelas;
- (b) Perigo de colisão em pleno voo (*mid-air collision*) da aeronave intrusa (*blunder*) após a manobra de escape com uma terceira aeronave e,
- (c) Perigo de colisão da aeronave *evader* com obstáculos após a manobra de escape.

Nesta análise de perigo, o evento inicial é a suposta existência da aeronave intrusa (*blunder*) como apresentado na Figura 3.5. Após a ocorrência do evento inicial, existe a possibilidade do controlador de tráfego aéreo e o piloto da aeronave intrusa (*blunder*) intervirem no processo. Em caso negativo, será considerada uma situação não resolvida de transgressão. Nestas condições, aeronave intrusa irá cruzar a região de não transgressão, NTZ (*No Transgression Zone*).

(*): Ocorrência não esperada pelo controlador de tráfego aéreo e que pode resultar em situações potenciais de conflito como a navegação pela aeronave intrusa na pista de aproximação errada.

Fig. 3.6 - Árvore de Falha: Operação de Aproximação em Pistas Paralelas

3.4. Modelos de Análise de Colisão entre Aeronaves

No controle do tráfego aéreo, a segurança é tipicamente caracterizada pela prevenção de ocorrência de conflitos. O conflito indica a situação onde duas aeronaves se aproximam uma da outra a uma distância suficientemente próxima de um valor de referência mínimo permitido. Esta prevenção é realizada através do monitoramento das aeronaves pelo centro de controle de tráfego aéreo (ATC) e/ou pilotos por meio do uso de equipamentos adequados embarcados nas aeronaves (*cockpit*).

O equipamento embarcado no “*cockpit*” das aeronaves, que contém o algoritmo de predição de conflitos, é dividido em duas partes: a detecção do conflito e a resolução do conflito. Na literatura técnica, tais algoritmos são genericamente denominados de CD&R (*Conflict Detection and Resolution*). Algoritmos CD&R permitem sinalizar ao piloto acerca de possíveis conflitos gerado pelo tráfego de aeronaves nas vizinhanças (Hu; Prandini; Sastry, 2000).

Os algoritmos CD&R estão inseridos em equipamentos denominados no âmbito da ICAO (*International Civil Aviation Organization*) de ACAS (*Airborne Collision Avoidance System*); o equivalente nos EUA é o TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*)^(*). Tais dispositivos utilizam sinais de transponders^(**) de radares de vigilância secundária denominados de SSR (*Secondary Surveillance Radar*) e operam na faixa de frequência de 1.030 a 1.090 MHz (ACAS II, 1998).

(*): Informações adicionais podem ser encontradas em “*Radio Technical Commission for Aeronautics – Minimum Operational Performance standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS) airborne equipment: Technical Report RTCA/DO-185, RTCA, September 1990*”.

(**): Componente de um sistema embarcado na aeronave que responde as interrogações de um sistema em terra. Genericamente, indicam canais de comunicação que funcionam como unidade repetidora.

Os dados de entrada (posição e velocidade) utilizados no processamento dos algoritmos CD&R (*Conflict Detection and Resolution*) advêm das informações obtidas nas interrogações realizadas nos transponders das aeronaves na vizinhança. O resultado do tratamento desses dados pelo ACAS (*Airborne Collision Avoidance System*) é a emissão de alertas que devem ser interpretados corretamente pelo piloto.

Estes alertas são classificados em sinalizações do tipo TA (*Traffic Advisories*), que indicam ao piloto uma busca visual de aeronaves intrusas, e tipo RA (*Resolution Advisories*), com recomendações de manobras corretivas. Os tipos previstos de ACAS (*Airborne Collision Avoidance System*) são: ACAS I (disponibilizam apenas TAs), ACAS II (disponibilizam TAs e RAs no plano vertical) e ACAS III (disponibilizam TAs e RAs nos planos vertical e horizontal). Os sistemas em uso atualmente incluem o ACAS I e II (ACAS II *Programme*, 1999). No padrão americano, estes dispositivos são denominados de TCAS I, TCAS II e TCAS III.

Contudo, mesmo com a utilização desses equipamentos (ACAS) nas aeronaves, a responsabilidade, tanto dos pilotos como controladores de tráfego aéreo, não são alteradas com relação à segurança da aeronave (ICAO Doc 4444-RAC 501).

No estudo das técnicas CD&R (*Conflict Detection and Resolution*) são utilizados diversos modelos de predição, cujo objetivo é a determinação de situações de perigo de conflito entre aeronaves. A seguir, são apresentados brevemente dois desses modelos denominados de modelo geométrico e modelo probabilístico.

No primeiro modelo (geométrico) é utilizado um par de trajetórias, onde incertezas são introduzidas ao longo dessas trajetórias. Estas incertezas são traduzidas em uma região do espaço (três dimensões) em torno da trajetória prevista, sendo denominado de zona de proteção. A zona de proteção (cujo tamanho e forma é variável em função do tempo) é tal que, em qualquer instante, no futuro, a probabilidade de que uma aeronave esteja dentro de sua zona de proteção é maior do que algum valor de referência previamente definido. Portanto, as aeronaves estarão em conflito (geométrico) quando a distância entre a zona de proteção das duas aeronaves tornar-se menor que uma separação mínima permitida (Bakker et al, 2001).

Intuitivamente, cada aeronave pode ser representada por dois cilindros virtuais: um interno, denominado de *zona protegida*, e outro externo, denominado de *zona de alerta*. No espaço aéreo americano, o raio e a altura do cilindro virtual da zona protegida corresponde a 2,5 milhas náuticas e 2.000 pés respectivamente. A zona de alerta apresenta um raio de 20 milhas náuticas e altura de 4.000 pés. A Figura 3.7 ilustra essas zonas. Dessa forma, será considerado um evento de conflito (perda de separação entre duas aeronaves) quando a zona protegida de uma das aeronaves for invadida pela outra (intrusa). Nas situações onde a aeronave intrusa invadir a zona de alerta, mecanismos de alerta e sinalização embarcados nas aeronaves são acionados (Lozito; McGann; Mackontosk, 1999).

Fig. 3.7 – Zona Protegida e de Alerta

A análise em duas dimensões, sem considerar as incertezas nas trajetórias das aeronaves, é apresentada a seguir, segundo Watkins; Lygeros (2002). Neste caso, a zona de proteção da aeronave intrusa é um círculo de raio s , podendo ser expresso por $C = \{(x_r, y_r) / x_r^2 + y_r^2 < s^2\}$, onde (x_r, y_r) indica a coordenada da aeronave intrusa relativa à posição da aeronave de referência.

Assumindo que a velocidade relativa mantenha-se constante, o ponto (x_r, y_r) referente à aeronave intrusa, está em uma linha reta com direção dada pelo ângulo de proa (*heading*) $\phi_r^{(*)}$ como indica a Figura 3.8.

(*): Direção apontada pelo eixo longitudinal de uma aeronave.

Fig. 3.8 - Encontro Geométrico em 2D

Por geometria, a separação mínima ($s_{\min}$) entre as aeronaves pode ser determinada. Nessas condições, seja $P_r = (x_r, y_r)$, a posição da aeronave intrusa relativa à aeronave de referência. A posição da aeronave de referência é fixada na origem. Define-se o vetor unitário $\vec{n}$ paralelo a trajetória da aeronave intrusa com direção ϕ_r . Portanto, este vetor pode ser expresso por:

$$\vec{n} = \vec{i} \cdot \cos \phi_r + \vec{j} \cdot \sin \phi_r = (\cos \phi_r, \sin \phi_r) \quad (1)$$

desde que $|\vec{n}| = 1$ e $\vec{i}$ e $\vec{j}$ são os vetores unitários dos eixos das ordenadas x e y .

Se β é o ângulo entre os vetores $\vec{P}_r$ e $\vec{n}$, então a distância mínima ($s_{\min}$) entre as trajetórias das duas aeronaves é obtido pelo produto escalar de $\vec{P}_r$ e $\vec{n}$, isto é:

$$s_{\min} = |\vec{P}_r| \cdot |\vec{n}| \cdot \cos \beta = |\vec{P}_r \times \vec{n}| \quad (2)$$

Caso o resultado em (2) seja menor que uma separação mínima aceitável, então ocorrerá o conflito e um alarme adequado deverá ser emitido.

O modelo probabilístico corresponde ao modelo adotado pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*), segundo a abordagem utilizada em Reich (1964). De acordo com Bakker; Kremer; Blom (2000), a abordagem de Reich aplica-se somente sob suposições bastante restritivas, tais como a exigência da independência entre as variáveis indicativas de velocidade e posição das aeronaves, além da consideração de que o processo estocástico representativo da velocidade seja continuamente diferenciável no tempo.

Neste contexto, Bakker; Kremer; Blom (2000) propõe um novo modelo denominado de “Modelo Generalizado de Risco de Colisão de Reich”, cuja idéia central é brevemente apresentada a seguir. Os detalhes matemáticos e as suposições adotadas neste modelo podem ser vistas em Bakker; Blom (1993) “*Air Traffic Collision Risk Modelling – IEEE Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control*”.

Seja $\{S_t^i\}$ o processo estocástico representativo da posição de uma dada aeronave i no tempo t e, $\{V_t^i\}$, o processo estocástico correspondente a velocidade dessa aeronave i . As posições definidas são sempre referenciadas em relação ao centro de massa da aeronave. Se os elementos s_t^i e s_t^j de $\{S_t^i\}$ indicam as posições do par de aeronaves (i, j) no tempo t , então sua posição relativa pode ser representada pelo processo estocástico $S_t^\Delta = S_t^i - S_t^j$, e a velocidade relativa, pelo processo $v_t^\Delta = v_t^i - v_t^j$.

Além disso, seja D uma certa área em torno da origem. A posição relativa s_t da aeronave entra na área D no instante t se a seguinte relação é satisfeita:

$$s_{t-\Delta} \in D^c \text{ e } s_t \in D \text{ para } \Delta \rightarrow 0 \quad (3)$$

onde D^c é um conjunto aberto em $\mathbb{R}^3$ e igual ao complemento de D .

Caso a relação (3) seja satisfeita, então é caracterizada a entrada da aeronave (posição relativa s_t) na área delimitada pela circunferência de D . Este evento é denominado de *cruzamento (in-crossing)*.

A taxa de *cruzamento (in-crossing)*, $\varphi(t)$, é definida como o número esperado (probabilidade) de eventos *in-crossing* por unidade de tempo, ou seja,

$$\varphi(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{P\{s_t \in D, s_{t-\Delta} \in D^c\}}{\Delta} \quad (4)$$

O risco de colisão entre duas aeronaves no intervalo de tempo $[t_1, t_2]$ e, portanto, a probabilidade de ocorrência do evento *cruzamento (in-crossing)*, $P_{ic}(t_1, t_2)$, pode

$$\text{então ser calculado pela expressão } P_{ic}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \varphi(t) dt \quad (5)$$

Outras técnicas e abordagens propostas no âmbito dos algoritmos de detecção e resolução de conflitos (CD&R) podem ser encontradas na pesquisa metodológica “*A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods – IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*” em Kuchar; Yang (2000).

Neste trabalho é utilizada a abordagem do modelo geométrico. A partir desse modelo são determinados os níveis de perigo associado às operações de aproximação, em função do espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas. No capítulo 5 é apresentada uma proposta de avaliação de perigo com base neste modelo.

4. MÉTODO DE MONTE CARLO

Este capítulo tem por finalidade apresentar os conceitos fundamentais do Método de Monte Carlo. Serão introduzidos os princípios básicos do método, alguns exemplos de aplicações e as principais técnicas utilizadas para a geração de números pseudoaleatórios. Os resultados numéricos obtidos no estudo de caso proposto neste trabalho estão fundamentados no Método de Monte Carlo.

4.1. Introdução

A introdução paulatina de computadores no meio científico, juntamente com o desenvolvimento de novas abordagens e técnicas de investigação, permitiram aos pesquisadores a análise e a simulação de sistemas complexos de forma simples e de baixo custo. Uma dessas técnicas é conhecida como *Método de Monte Carlo*, cujo princípio básico fundamental é a simulação de variáveis aleatórias em computadores. O termo, método de Monte Carlo, deve ser compreendido como uma técnica ou procedimento estocástico que se baseia no uso de números aleatórios e de conceitos de probabilidades para a investigação de problemas determinísticos e não determinísticos. O nome desta técnica é oriundo de Monte Carlo, cidade do principado de Mônaco, célebre pelos seus cassinos e jogos de azar.

O método de Monte Carlo pode ser utilizado na modelagem de uma variedade de problemas complexos. A solução das equações que descrevem a interação entre dois átomos pode ser relativamente simples, mas a solução das mesmas equações para centenas ou milhares de átomos é praticamente impossível. Através do método de Monte Carlo, um sistema de grandes proporções e mais complexo pode ser amostrado em um número de configurações aleatórias, cujos resultados podem ser utilizados para descrever o sistema como um todo (Woller, 1996).

A análise de problemas através do método de Monte Carlo inclui, entre outros, a simulação de fenômenos naturais, a simulação de equipamentos experimentais e uma variedade de aplicações na matemática. Exemplos de aplicações do método de Monte Carlo nas diversas áreas do conhecimento incluem:

- Física: transporte de radiação na atmosfera, espalhamento de nêutrons e evolução estelar;
- Comunicações: análise de sinais/ruídos, estudo de interferências em sistemas rádio e sistemas móveis celulares;
- Aviação: ferramenta de análise de conflito;
- Sistemas críticos de segurança: análise de confiabilidade e disponibilidade.

O grande sucesso do método de Monte Carlo tem-se despendido nas situações onde o problema matemático básico é investigado através da simulação de algum processo aleatório. Na realidade, na investigação de um problema, freqüentemente o processo em análise é substituído por um processo artificial simplificado que possa ser simulado em um computador, de forma a permitir uma aproximação do processo original. Em geral, o uso de um modelo simplificado é ditado pela incompletude das informações sobre o processo ou fenômeno em estudo. Contudo, existem problemas computacionais que não estão relacionados com a teoria da probabilidade (problemas determinísticos), mas cujo método pode perfeitamente ser aplicado. Exemplos típicos dessa abordagem incluem o cálculo de integrais definidas, sistemas lineares e equações diferenciais (Buslenko et al, 1966).

Segundo Newman; Odell (1971), John von Neumann e Stanley Ulam foram os primeiros a advogarem a idéia de sistematicamente inverterem a situação usual no tratamento de problemas determinísticos. Neste caso, é encontrado primeiro uma função de probabilidade que represente o problema em análise e, em seguida, resolvendo-a por algum procedimento de amostragem. Portanto, as duas razões básicas para a utilização do método de Monte Carlo na solução de problemas determinísticos são: o primeiro diz respeito ao fato de que existem diversos problemas de natureza muito complexa, onde técnicas teóricas não são conhecidas para a sua solução; em segundo lugar, às vezes um método de solução é conhecido, mas muito trabalhoso ou praticamente impossível como na avaliação de integrais múltiplas com n dimensões, cujo integrando não sejam funções simples.

4.2. Princípios do Método de Monte Carlo

A seguir são apresentados os fundamentos do método de Monte Carlo e alguns exemplos de aplicações desta técnica.

4.2.1. Conceitos Básicos

Segundo Buslenko et al (1966), o método de Monte Carlo consiste na solução de um problema através da observação de um processo aleatório que o represente, de forma que os parâmetros do processo escolhido sejam as variáveis desconhecidas a determinar. Pelo cômputo dos dados estatísticos do processo aleatório, os valores observados são então aproximados as variáveis a serem determinadas.

Por exemplo, a quantidade a determinar ‘x’ pode ser representada pela esperança $E[\xi]$ de uma certa variável aleatória. A determinação do valor aproximado da quantidade ‘x’, pelo método de Monte Carlo, consiste na amostragem de tamanho N de valores da variável ξ , em uma série de testes independentes $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$. A característica estatística (valor médio) é expresso por: $\xi = \frac{\xi_1 + \xi_2 + \dots + \xi_N}{N}$ (1)

Portanto, de acordo com a Lei dos Grandes Números ^(*): $\xi \approx E[\xi] = x$, cuja probabilidade pode se aproximar da unidade para N suficientemente grande.

(*): Lei dos Grandes Números (ou Lei Fraca dos Grandes Números) – “Se X é uma variável aleatória com variância $V[X] < \infty$, então para qualquer constante $c > 0$, a média amostral $M_n(X)$ satisfaz:

(a) $\lim_{n \rightarrow \infty} P \left[\left| M_n(X) - \mu_X \right| \geq c \right] = 0$, ou de forma equivalente,

(b) $\lim_{n \rightarrow \infty} P \left[\left| M_n(X) - \mu_X \right| < c \right] = 1$, onde $\mu_X = E[X]$ é a média ou esperança da variável aleatória X”.

A média amostral $M_n(X)$ é definida da seguinte forma: para a i-ésima variável aleatória $X_1, X_2, \dots, X_n$ com função densidade de probabilidade $f_X(x)$, a média amostral de X é uma variável aleatória definida por $M_n(X) = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$, de

forma que: $E[M_n(X)] = E[X]$ e $V[M_n(X)] = \frac{V[X]}{n}$,

onde $V[X]$ é a variância da variável aleatória X (Yates; Goodman, 1999).

A essência do método de Monte Carlo é a modelagem do problema por meio de funções densidade de probabilidades (*probability density function*) obtidas a partir de dados experimentais ou de modelos teóricos. Dessa forma, a simulação pelo método de Monte Carlo consiste na amostragem da função densidade de probabilidade, a partir de *números aleatórios* distribuídos uniformemente em $[0,1]$. Os resultados dessas amostragens são então registrados ou combinados de forma adequada para produzir os resultados desejados. A Figura 4.1 ilustra esse conceito (CSEP, 1995).

Fig. 4.1 - Simulação de um Sistema Genérico pelo Método de Monte Carlo

Segundo o *Computational Science Education Project* (CESP) 1995, os principais elementos que compõe a simulação de um sistema pelo método de Monte Carlo são:

- Função densidade de probabilidade: o sistema físico (ou matemático) deve ser descrito por um conjunto de funções densidade de probabilidade.
- Geradores de número aleatórios: uma fonte de números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo unitário deve estar disponível.
- Regra de amostragem: definição de uma prescrição (receita) de amostragem a partir da função densidade de probabilidade especificada, assumindo a disponibilidade dos números aleatórios sobre o intervalo unitário.
- Contagem: os resultados de interesse são registrados (armazenados).

- Estimativa de erro: uma estimativa do erro estatístico (variância) como função do número de testes pode ser avaliada.
- Paralelismo e vetorização: algoritmos que permitem que o método de Monte Carlo seja implementado com mais eficiência e rapidez podem ser avaliadas.

Os números aleatórios a serem utilizados no método de Monte Carlo podem ser disponibilizados em forma de tabelas ou gerados pelo lançamento de moedas, dados, roletas, ou obtidos por quaisquer outros dispositivos mecânicos ou eletrônicos. Devido à dificuldade na manipulação desses dispositivos, métodos matemáticos foram desenvolvidos e incluídos dentro do computador, de forma que, a partir do “programa-base” representativo do modelo de um problema, os *números aleatórios* são gerados à medida que forem solicitados, eliminando-se assim a necessidade da alimentação do computador com números aleatórios que seriam provenientes de tabelas ou de outros dispositivos quaisquer. Tais *números aleatórios* assim obtidos são denominados de *números pseudoaleatórios* (Shimizu, 1996).

4.2.2 Exemplos de Aplicações do Método de Monte Carlo

A seguir são apresentados três exemplos de aplicações do método de Monte Carlo.

Exemplo 1: Cálculo de integrais definidas (Billinton; Li, 1994).

Considere a seguinte integral definida, cujo gráfico é mostrado na Figura 4.2.

$$I = \int_0^1 f(x) dx \quad (2)$$

Fig. 4.2 – Gráfico da Função $f(x)$

O valor da integral definida I corresponde à área A sob a curva $y = f(x)$ e as ordenadas $x = 0$ e $x = 1$. Seja N o número de pontos a serem lançados aleatoriamente

no intervalo $[0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1]$ e K , o número de pontos que “caiam” nessa área A . Por exemplo, (x_1, y_1) e (x_2, y_2) indicam dois pontos lançados aleatoriamente na Figura 4.2, onde (x_1, y_1) é computado como um acerto e, (x_2, y_2) não. Portanto, pelo método de Monte Carlo, o valor da integral pode ser aproximado como sendo igual ao valor da probabilidade dos pontos que “cairão” na área a ser determinada, isto é:

$$I = p \approx \frac{K}{N}. \quad (3)$$

A obtenção dos resultados numéricos é realizada pela simulação de números aleatórios dado pelo par (x_i, y_i) e uniformemente distribuídos em $[0, 1]$. Em seguida, é verificado se a desigualdade $y_i \leq f(x_i)$ é satisfeita para o cômputo do valor de K e, por conseguinte, o valor da integral I . A precisão a ser obtida neste caso irá depender do número de iterações e da qualidade dos números aleatórios utilizados.

Como pode ser observado, a integral $I = \int_0^1 f(x) dx$ representa um problema não aleatório, mas o método de Monte Carlo aproxima uma solução pela introdução de uma variável aleatória U uniformemente distribuída na região de integração.

Segundo Newman; Odell (1971), do ponto de vista estatístico, o valor da integral I representa a esperança da variável aleatória $f(U)$, onde U é a variável aleatória distribuída uniformemente no intervalo $(0, 1)$ e $f(U)$, a variável aleatória obtida pela aplicação da função f em U . Se ϕ indica a função densidade de probabilidade de U , então por definição, a esperança da função $f(u)$ é dada pela expressão:

$$E[f(u)] = \int_0^1 f(u) \phi(u) du \quad (4)$$

Desde que ϕ é igual a 1 na região de integração, pode-se escrever:

$$E[f(u)] = \int_0^1 f(u) du \quad (5)$$

Portanto, pode-se estimar a integral I da expressão (2) pela geração de amostras $u_1, u_2, \dots, u_n$ da variável aleatória U uniformemente distribuída em $(0, 1)$, estabelecendo-se a relação:

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(u_i) \quad (6)$$

Exemplo 2: Cálculo de π pelo método de *Buffon* (Buslenko et al, 1966).

Historicamente, este cálculo representa o primeiro exemplo de aplicação do método de Monte Carlo. Foi celebrado no “Problema do Lançamento de Agulhas” descrito em 1777 no tratado *Essai d'Arithmetique Morale* pelo cientista francês Buffon.

Sobre uma superfície plana, considere um sistema de linhas paralelas espaçada de uma distância d como indica a Figura 4.3.

Fig. 4.3 - Sistema de Linhas Paralelas

Suponha que uma agulha de comprimento a é lançada sobre o plano, de modo que sua posição no sistema de linhas paralelas é aleatória. É natural assumir que o ângulo α , inclinação que a agulha faz com as linhas paralelas do sistema seja distribuída uniformemente no intervalo $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$. Analogamente, pode-se supor também que a posição do centro da agulha entre o par de linhas paralelas seja distribuída uniformemente no intervalo $0 \leq x \leq d$.

As circunstâncias em que a agulha não intercepta as linhas paralelas é equivalente ao cumprimento das seguintes relações:

$$0 < x - \frac{a}{2} \sin \alpha \text{ e } x + \frac{a}{2} \sin \alpha < d \quad (7)$$

Desde que x e α são variáveis aleatórias uniformemente distribuídas, a probabilidade p de que as desigualdades indicadas em (7) sejam conjuntamente satisfeitas é proporcional à área D entre as curvas como ilustra a Figura 4.4.

Ou seja,
$$p = \frac{1}{\pi d} \iint_D dx d\alpha \quad (8)$$

Fig. 4.4 – Área D entre as Curvas

A equação (8) pode ser justificada da seguinte forma: considere que $F_{X,A}(x,\alpha)$ e $f_{X,A}(x,\alpha)$ representem respectivamente, a função distribuição de probabilidade cumulativa conjunta e a função densidade de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias X (distância) e A (ângulo). Se $f_X(x)$ e $f_A(\alpha)$ são as funções densidade de probabilidade marginal de cada uma das variáveis aleatória X e A , então por definição, pode-se escrever:

$$P[X \leq x, A \leq \alpha] = F_{X,A}(x,\alpha) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{\alpha} f_{X,A}(x,\alpha) dx d\alpha \quad (9)$$

Desde que a variável aleatória A é uniformemente distribuída no intervalo

$$-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2, \text{ então } f_A(\alpha) = \frac{1}{\pi/2 - (-\pi/2)} = \frac{1}{\pi}.$$

Analogamente, se a variável aleatória X é uniformemente distribuída no intervalo

$$0 \leq x \leq d, \text{ então } f_X(x) = \frac{1}{d-0} = \frac{1}{d}.$$

Se as variáveis aleatórias X e A são independentes, pode-se escrever que:

$$f_{X,A}(x,\alpha) = f_X(x) \cdot f_A(\alpha) = 1/\pi d. \text{ Logo, a partir da equação (9):}$$

$$P\left[0 < X \leq d, -\frac{\pi}{2} < A \leq \frac{\pi}{2}\right] = F_{X,A}(x, \alpha) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^{\alpha} f_{X,A}(x, \alpha) dx d\alpha = \frac{1}{\pi d} \iint_D dx d\alpha$$

Se na avaliação da equação (8) for assumido que o comprimento da agulha a satisfaz $a \leq d$, então:

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{\pi d} \iint_D dx d\alpha = \frac{1}{\pi d} \left\{ \int_{-\pi/2}^0 \left[\left(d - \frac{a}{2} \sin \alpha\right) + \left(\frac{a}{2} \sin \alpha\right) \right] d\alpha + \int_0^{\pi/2} \left[\left(d - \frac{a}{2} \sin \alpha\right) - \left(\frac{a}{2} \sin \alpha\right) \right] d\alpha \right\} = \\ &= \frac{1}{\pi d} \left(d \alpha \Big|_{-\pi/2}^0 + d \alpha \Big|_0^{\pi/2} + a \cos \alpha \Big|_0^{\pi/2} \right) = \frac{1}{\pi d} \left(\frac{\pi d}{2} + \frac{\pi d}{2} + a (\cos \frac{\pi}{2} - \cos 0) \right) = 1 - \frac{a}{\pi d}. \end{aligned}$$

Portanto, a probabilidade de que a agulha irá tocar uma das linhas paralelas é:

$$1 - p = \frac{a}{\pi d} \quad (10)$$

Em particular, se $a = d$ (distância entre as linhas paralelas igual ao comprimento da agulha), a probabilidade da agulha interceptar uma das linhas é $1/\pi$. Logo, se uma agulha for lançada N vezes sobre o sistema de linhas paralelas e desses lançamentos, K vezes a agulha interceptar uma das linhas, então em vista da Lei dos Grandes Números, o valor de π pode ser calculado pela seguinte relação:

$$\frac{K}{N} \approx \frac{1}{\pi} \quad (11)$$

Exemplo 3: Cálculo da Confiabilidade R_S de um Sistema (Billinton; Li, 1994).

Sejam A e B componentes independentes e reparáveis de um sistema em paralelo, onde a operação do sistema exige que ao menos um dos componentes esteja em serviço. A duração de ambos os componentes segue a distribuição exponencial com taxas de falhas e taxas de reparos respectivamente iguais a (λ_A, μ_A) e (λ_B, μ_B) . Analiticamente, a confiabilidade do sistema, sem considerar o reparo, pode ser obtida pela seguinte expressão para um determinado tempo $T^{(*)}$:

$$R_S = 1 - (1 - e^{-\lambda_A T})(1 - e^{-\lambda_B T}) \quad (12)$$

Se os reparos são levados em consideração, o cálculo de R_S é relativamente complexo pelo uso das técnicas analíticas. Neste caso, a confiabilidade do sistema pode ser estimada pela análise dos resultados de um experimento aleatório, cujo teste é projetado de modo a observar como o sistema se comporta antes do tempo T .

O primeiro passo é a simulação do processo de transição dos dois componentes como descrito a seguir. É amostrada inicialmente a distribuição de probabilidade da duração do estado dos componentes, ou seja, é amostrada a transição cronológica para cada um dos componentes. Em seguida, o processo de transição cronológica do sistema é criado pela combinação dos processos de transição cronológica de todos os componentes. Esta abordagem pode ser resumida nos passos a seguir:

(*): Seja E_i o evento indicativo de que o subsistema i opera com sucesso; $R_i = P(E_i)$ a confiabilidade do subsistema i e R_S a confiabilidade do sistema composto de n subsistemas em paralelo.

Define-se a variável Q_S (não confiabilidade do sistema). Desse modo, desde que na configuração em paralelo o sistema está operacional a menos que todos os subsistemas falhem, então:

$Q_S = P(\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_n)$, onde $\bar{E}_i$ é o evento complementar, indicativo de que o subsistema i não está operacional.

Se todos os eventos são independentes, pode-se escrever:

$Q_S = P(\bar{E}_1) \cdot P(\bar{E}_2) \dots P(\bar{E}_n)$. Mas $P(\bar{E}_i) = 1 - R_i$.

Logo, $Q_S = (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \dots (1 - R_n)$ ou $Q_S = \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$.

Desde que $R_S = 1 - Q_S$, então:

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}),$$

admitindo que os componentes seguem a distribuição exponencial (Kapur; Lamberson, 1977).

- (I) Especificação do estado inicial de cada componente. Em geral, é assumido que todos os componentes estão em serviço (*up*);
- (II) Amostragem da duração de cada componente com base no seu estado atual. No caso da distribuição exponencial, a amostragem do valor da duração do estado pode ser obtida por $T_i = - (1/\lambda) \cdot \ln(U_i)$ (*), onde U_i representa um número aleatório uniformemente distribuído em $[0, 1]$ correspondente ao i -ésimo componente. Caso o estado atual indique *em serviço*, λ_i representará a taxa de falha do i -ésimo componente; caso contrário, se indicar o estado *fora de serviço* (*down*), λ_i representará a taxa de reparo do i -ésimo componente;
- (III) Repetição do passo (II) em um dado período de tempo. Coletar os valores das amostras de cada duração de estado de todos os componentes. Portanto, o processo de transição cronológica de cada componente para um dado período de tempo pode ser obtido. A Figura 4.5 ilustra um exemplo.

Fig. 4.5 - Processo de Transição Cronológica do Estado dos Componentes

(*): A simulação da variável aleatória T_i pode ser feita mediante a solução da equação $\int_0^{T_i} f(t) dt = U_i$. Assumindo que $f(t)$

tem uma distribuição exponencial, isto é, $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, onde U_i representam números aleatórios uniformemente distribuídos em $[0, 1]$, então: $\int_0^{T_i} \lambda e^{-\lambda t} dt = U_i \Rightarrow \lambda \left(\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right) \Big|_0^{T_i} = -(e^{-\lambda T_i} - 1) = U_i$.

Portanto, $e^{-\lambda T_i} = U_i - 1 \Rightarrow T_i = -\frac{1}{\lambda} \ln(U_i - 1)$. Desde que U_i representam números aleatórios, então $U_i - 1$ também

representarão. Portanto, $T_i = -\frac{1}{\lambda} \ln(U_i)$ (Sobol, 1983).

- (IV) O processo de transição cronológica do sistema pode ser obtido pela combinação do processo de transição cronológica de cada um dos componentes. A Figura 4.6 ilustra o processo de transição cronológica do estado do sistema para os dois componentes apresentados na Figura 4.5.

Fig. 4.6 - Processo de Transição Cronológica do Estado do Sistema

- (V) Caso não haja sobreposição de reparo no intervalo $[0, T]$, o teste é dito com *sucesso*; caso contrário, com *disfunção* (*failure*). Define-se o indicador:

$$X_i = \begin{cases} 0, & \text{se o } i\text{ésimo teste é um sucesso} \\ 1, & \text{se o } i\text{ésimo teste é uma disfunção} \end{cases} \quad (13)$$

Portanto, a confiabilidade do sistema para um determinado tempo T de operação,

pode ser estimado pela expressão $R_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$, onde N é o número de testes.

4.3. Números Aleatórios e Pseudoaleatórios

Segundo Buslenko et al (1966), o grau de sucesso do método de Monte Carlo é determinado fundamentalmente pelos seguintes fatores:

- Qualidade dos números aleatórios e,
- Escolha do algoritmo gerador.

Entende-se por número aleatório, uma variável estocástica que atenda as seguintes condições (Kleijnen; Groenendaal, 1992):

- A variável seja uniformemente distribuída no intervalo $[0, 1]$ e,
- A seqüência dessas variáveis apresente independência estatística.

Em geral, a simulação de variáveis aleatórias se baseia no uso de tabelas de números aleatórios produzidos, por exemplo, por um dispositivo gerador, ou ainda de *números pseudoaleatórios* gerados por métodos matemáticos no computador. Números aleatórios obtidos através de dispositivos mecânicos são similares àquele ilustrado na Figura 4.7, onde o algarismo sorteado é aquele indicado pela seta. Um número nesta tabela pode ser formado por um algarismo ou conjunto de números aleatórios obtidos pelo dispositivo gerador.

Fig. 4.7 - Gerador de Números Aleatórios Mecânico

Neste dispositivo gerador, a simulação da variável aleatória é expressa pela distribuição $\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & \dots & 9 \\ 0,1 & 0,1 & 0,1 & \dots & 0,1 \end{pmatrix}$, de modo que o sorteio de cada um desses números é uniformemente distribuído entre os algarismos 0 a 9 (Sobol, 1983).

Várias técnicas estão disponíveis para a geração de números aleatórios, além do dispositivo descrito anteriormente. Segundo Kleijnen; Groenendaal (1992), as principais são:

- (a) Dado de dez faces: dado cujas faces são numeradas de 0, 1,..., 9 pode gerar números aleatórios com a precisão desejada. A geração de cada número decimal requer apenas um lançamento.
- (b) Lançamento de uma moeda: atribui-se, por exemplo, o valor '1' para a face cara e '0' para a coroa. Lança-se a moeda 'n' vezes. Ordena-se o resultado dos 'n' lançamentos um após o outro, de modo a formar o número binário de 'n' bits. Dividindo-se este número por $2^n - 1$, tem-se o número decimal entre 0 e 1. Dessa forma, pode-se gerar 2^n diferentes números aleatórios. Para $n = 3$, o conjunto dos 8 números binários distintos é dado por $B = \{000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111\}$. Na divisão dos elementos do conjunto B pelo número decimal $2^3 - 1 = 7$, obtém-se 8 possíveis números aleatórios, todos com probabilidades iguais.
- (c) Outros dispositivos físicos: é possível a construção de dispositivos mecânicos mais complexos (roda da fortuna) e outros baseados em dispositivos eletrônicos mais sofisticados (emissão de raios gama). A desvantagem desses dispositivos (mecânicos e eletrônicos) reside no fato de que a sequência dos números não é reproduzível. A reprodução é importante no tocante ao *debugging* do programa de simulação. Ajustando-se o programa e alimentando-o com os mesmos números, o programa deve produzir bons resultados. Outro aspecto refere-se ao fato de outros pesquisadores repetirem o mesmo experimento.

Números aleatórios gerados por alguma fórmula de recorrência no computador são denominados de *números pseudoaleatórios*. Indicam números que são obtidos a partir de uma prescrição e que servem à simulação de uma variável aleatória. Cada número sucessivo, n_{j+1} , é formado do número precedente n_j (ou grupo de números precedentes) aplicando-se algum algoritmo que consista de operações aritméticas e lógicas. Tais sequências de números não são aleatórias, mas, no entanto, podem satisfazer certos critérios estatísticos de aleatoriedade. Os geradores determinísticos produzem números em uma sequência tal que os 'k' números anteriores determinam os próximos números. Portanto, desde que o conjunto de números utilizados pelo

computador é finito, a sequência irá repetir-se. O comprimento da sequência anterior ao começo da repetição é denominado de período.

Os requisitos básicos de um gerador de números pseudoaleatórios são (Buslenko et al, 1966), (Billinton; Li, 1994) e (Gentle, 1998):

- Uniformidade: os números pseudoaleatórios devem se aproximar o máximo possível da distribuição uniforme;
- Independência: a correlação entre os números pseudoaleatórios deve ser o mínimo possível e,
- Longo período: o período de repetição deve ser suficientemente longo.

4.4. Técnicas de Geração de Números Pseudoaleatórios

Diversos métodos de geração de números pseudoaleatórios estão disponíveis na literatura técnica. Didaticamente, estes geradores são divididos em dois grupos:

- Números pseudoaleatórios uniformemente distribuídos: geradores de números pseudoaleatórios originados a partir de uma variedade de técnicas.
- Método da Transformada Inversa: geradores de números pseudoaleatórios obtidos a partir de certa função distribuição de probabilidade. Neste método, as distribuições de probabilidade mais utilizadas são as distribuições exponenciais, normais (Gaussiana), Weibull, entre outras.

4.4.1. Números Pseudoaleatórios Uniformemente Distribuídos

A seguir são descritas as principais técnicas utilizadas na geração de números pseudoaleatórios uniformemente distribuídos em um dado intervalo:

(a) *método de meio dos quadrados ou truncamento* (Buslenko et al, 1966), (Sobol, 1983) e (Kleijnen; Groenendaal, 1992).

Esta técnica é baseada na extração dos dígitos centrais de um produto, sendo proposta por J. von Neumann em 1941. Um número arbitrário, α_0 , é escolhido para iniciar o processo de recorrência consistindo de um número par ($2k$) de dígitos

binários. Este número é elevado ao quadrado produzindo um número α_0^2 de $4k$ dígitos. O número α_1 é tomado como sendo os $2k$ dígitos centrais (de $k + 1$ até $3k$ inclusive) de α_0^2 ; em seguida, o processo continua.

Em termos de números decimais, suponha um número inicial x_0 com m dígitos. Quando x_0 é elevado ao quadrado, obtém-se um número com até $2m$ dígitos; caso este número tenha menos de $2m$ dígitos, acrescentam-se zeros a sua esquerda. O próximo número x_1 é obtido com os m dígitos centrais de x_0^2 . Para se obter um número no intervalo $[0, 1)$, divide-se x_1 por 10^m . Repetindo este processo é obtida a seqüência $(x_i / i = 0, 1, \dots)$. Exemplificando, se $m = 2$ (dois dígitos decimais), então o maior número é 99, de modo que até 100 números podem ser gerados. Caso o processo inicie-se com o valor arbitrário 23, então o seguinte resultado será obtido:

x	x^2	nº aleatório
23	0529	0,52
52	2704	0,70
70	4900	0,90
90	8100	0,10
10	0100	0,10

e assim por diante.

Logo, a escolha do número 23 leva este método à ‘emperrar’ no número aleatório 0,10 após apenas quatro passos. Outra forma é utilizar valores decimais compreendidos entre 0 e 1 diretamente com o número de casas decimais desejado. Se $x_0 = 0,9876$, então $x_0^2 = 0,97535376$. Tomando-se as quatro casas decimais do meio, obtém-se $x_1 = 0,5353$. Repetindo o processo, $x_1^2 = 0,28654609$, então $x_2 = 0,6546$.

Esta forma de recorrência não apresenta uma seqüência de números aleatórios satisfatórios, além da função distribuição dos números pseudoaleatórios obtidos não ser uniforme. Uma variante da técnica de von Neumann, para que os números pseudoaleatórios se aproximem da distribuição uniforme, é a escolha arbitrária de dois números, por exemplo, α_0 e α_1 . O produto $\alpha_0 \cdot \alpha_1$ é então formado e os dígitos centrais são utilizados como α_2 . O processo continua com α_1 e α_2 para encontrar α_3 , e assim por diante. Diversas outras técnicas com base no método de meio dos quadrados (ou truncamento) foram propostas, mas todas produzem uma seqüência

periódica de números pseudoaleatórios, cujo período não excede a 2^{2k} , onde k indica o número de dígitos do número aleatório.

(b) método da congruência (Hammersley; Handscomb, 1964), (Sobol, 1983), (Kleijnen; Groenendaal, 1992), (Billinton; Li, 1994), (CSEP, 1995) e (Gentle, 1998). O método da congruência multiplicativo é hoje o mais popular. Sua fórmula de recorrência tem a forma: $x_i \equiv a \cdot x_{i-1} \pmod{m}$ (14)

A relação básica da aritmética modular é a equivalência módulo m ($\pmod{m}$) também denominada de módulo congruente. Portanto, dois números são ditos equivalentes ou congruentes módulo m , se sua diferença é um inteiro divisível por m . Dados dois números ‘ a ’ e ‘ b ’, a relação de congruência é escrita como $a \equiv b \pmod{m}$. Intuitivamente, pode-se dizer que na equação (14), x_i é o resto quando $a \cdot x_{i-1}$ é dividido por ‘ m ’, onde m é algum número inteiro. Pela definição, a operação de congruência satisfaz as propriedades:

- Simétrica ($a \equiv b \pmod{m} \rightarrow b \equiv a \pmod{m}$)
- Reflexiva ($a \equiv a \pmod{m}, \forall a$) e,
- Transitiva ($a \equiv b \pmod{m}$ e $b \equiv c \pmod{m} \rightarrow a \equiv c \pmod{m}$).

A generalização da equação (14) é denominada de método da congruência e apresenta-se sob a forma:

$$x_i = (a \cdot x_{i-1} + c) \pmod{m} \quad (15)$$

onde ‘ a ’ é denominado de multiplicador, ‘ c ’ de incremento e ‘ m ’ de módulo do gerador. Portanto, a geração do próximo inteiro x_i é obtida a partir do inteiro anterior x_{i-1} e das constantes inteiras ‘ a ’, ‘ c ’ e da operação módulo m . Após o inteiro $a \cdot x_{i-1} + c$ ser gerado, a operação módulo m é aplicada para produzir o novo inteiro pseudoaleatório x_i .

Alguns autores representam a sequência de números pseudoaleatórios gerada pela equação (15) por meio da notação LCG (a, c, m, x_0) indicativo de gerador de congruência linear (LCG – *Linear Congruential Generator*), onde x_0 é o valor inicial arbitrário. Por exemplo, LCG(5, 1, 16, 1) indica que $a = 5$, $c = 1$, $m = 16$ e $x_0 = 1$. A

seqüência dos inteiros pseudoaleatórios gerados por este algoritmo é $\{1, 6, 15, 12, 13, 2, 11, 8, 9, 14, 7, 4, 5, 10, 3, 0, 1, 6, 15, 12, 13, 2, 11, 8, 9, 14, \dots\}$.

A escolha dos parâmetros a , c e m na equação (15) alteram as características estatísticas dos números aleatórios, de modo que uma boa escolha desses parâmetros é sempre uma tarefa difícil. Além disso, para que um gerador de números pseudoaleatórios seja útil na maioria das aplicações, o período deve ser da ordem de pelo menos 10^9 . Segundo Knuth (1969) apud Billinton; Li (1994), pode-se utilizar os seguintes princípios na seleção dos parâmetros:

- (I) $m = 2^k$, onde k é igual ao comprimento da palavra do computador;
- (II) $a \pmod{8} = 5$, de modo que a satisfaça $\frac{m}{100} < a < m - \sqrt{m}$;
- (III) c seja um número ímpar e satisfaça $\frac{c}{m} \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{3} \approx 0,21132$.

Os seguintes exemplos de relações de recorrência são uniformemente distribuídos no intervalo $[0, 1]$ (Buslenko et al, 1966):

- $x_{n+1} = 2^{-42} \cdot y_n$ e $y_{n+1} = 5^{17} \cdot y_n \pmod{2^{42}}$, $y_0 = 1$, com período de $2^{40} \sim 10^{12}$.
- $x_{n+1} = 2^{-36} \cdot y_n$ e $y_{n+1} = 5^{13} \cdot y_n \pmod{2^{36}}$, $y_0 = 1$, com período de $2^{34} \sim 2 \cdot 10^{10}$.

Deve ser observado que sempre existirá uma pequena e fraca correlação entre os números pseudoaleatórios gerados pelo método da congruência. Greenberger (1961) apud Billinton; Li (1994) mostra que o coeficiente de correlação ρ entre x_i e x_{i+1} apresenta os seguintes limites inferiores e superiores:

$$\rho = \frac{1}{a} - \left(\frac{6c}{am} \right) \left(1 - \frac{c}{m} \right) \pm \frac{a}{m} \quad (16)$$

No caso do gerador de congruência multiplicativo, $c = 0$ na equação (15). Se $a = \sqrt{m}$, o coeficiente de correlação ρ atinge seu limite inferior mínimo igual a $2/\sqrt{m}$. Portanto, se m é grande o suficiente, a correlação entre os números pseudoaleatórios gerados pode ser bastante fraca.

c) outros geradores de congruência

Existem diversas variações no método da congruência. A seguir são apresentados, de forma sucinta, dois desses geradores. Outros tipos de geradores mais complexos podem ser encontrados em (Gentle, 1998).

- Geradores recursivos múltiplos: simples extensão do gerador de congruência multiplicativo, onde se utilizam múltiplos valores de k para a geração do próximo valor. Sua fórmula de recorrência é:

$$x_i \equiv (a_1 x_{i-1} + a_2 x_{i-2} + \dots + a_k x_{i-k}) \bmod m \quad (17)$$

- Geradores de Fibonacci: estes geradores tornaram-se populares nos últimos anos. São conhecidos pela similaridade com a seqüência de Fibonacci dada por $\{1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \dots\}$, cujos elementos são formados pela relação $x_n = x_{n-1} + x_{n-2}$. Neste caso, os dois primeiros valores x_0 e x_1 devem ser fornecidos. A fórmula de recorrência generalizada do gerador de Fibonacci apresenta-se sob a forma:

$$x_n = (x_{n-p} + x_{n-q}) \bmod m, \text{ onde } p > q > 0 \quad (18)$$

No gerador de Fibonacci são necessários p valores iniciais $x_0, x_1, \dots, x_{p-1}$ para computar o próximo elemento da seqüência. Na maioria das aplicações, m é uma potência de dois, isto é, para um dado M , $m = 2^M$.

Pela escolha adequada de p , q e do valor inicial, o período desse gerador é igual a $P = (2^p - 1) \cdot 2^{M-1}$, onde $m = 2^M$. A notação LFG (p , q , M) de “*Lagged Fibonacci Generator*” com parâmetros p , q e M é freqüentemente utilizada.

Algumas versões desse gerador utilizam LFG (17, 5, 31) com $P \approx 2^{47}$ e LFG (55, 24, 31) com $P \approx 2^{85}$.

4.4.2 Método da Transformada Inversa

Pelo método da transformada inversa são obtidos números pseudoaleatórios a partir de determinadas funções de distribuição, tais como as distribuições de probabilidades exponenciais, gaussianas, Weibull, Gama e Log-Normal.

O método da transformada inversa tem como base a seguinte proposição: “Se a variável aleatória U segue uma distribuição de probabilidade uniforme no intervalo $[0, 1]$, então a variável aleatória inversa dada por $X = F^{-1}(U)$ admite a função distribuição de probabilidade cumulativa contínua $F(x)$ ” (Billinton; Li, 1994).

De fato, por definição pode-se escrever:

$$P(X \leq x) = P[F^{-1}(U) \leq x], \text{ desde que } X = F^{-1}(U) \quad (19)$$

Se a função $F(x)$ é uma função distribuição de probabilidade cumulativa, então $F(x)$ é uma função crescente. Logo,

$$P[F^{-1}(U) \leq x] = P[U \leq F(x)] \quad (20)$$

Desde que a variável aleatória U é uniformemente distribuída, então:

$$P[U \leq F(x)] = F(x) \Rightarrow P(X \leq x) = F(x) \quad (21)$$

Portanto, para a obtenção da variável aleatória equivalente $X \sim F$, basta gerar a variável aleatória U uniformemente distribuída no intervalo 0 e 1 e, em seguida, obter a transformada inversa $x = F^{-1}(u)$.

O seguinte algoritmo é utilizado para a geração de números pseudoaleatórios utilizando-se do método da transformada inversa:

- Passo 1 - gerar a seqüência de números aleatórios U uniformemente distribuída no intervalo $[0, 1]$.
- Passo 2 - obter a variável aleatória que tenha como função de distribuição cumulativa, $F(x)$, através da expressão $X = F^{-1}(U)$.

Como ilustração, seja a função densidade de probabilidade $f(x) = \begin{cases} 2x, & \text{se } x \in [0, 1] \\ 0, & \text{outros casos} \end{cases}$.

Dessa forma, a correspondente função distribuição de probabilidade cumulativa é

$$\text{obtida a partir de: } F(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < 0 \\ \int_0^x (2x) dx = x^2 & x \in [0,1] \\ 0, & \text{se } x > 1 \end{cases}$$

Portanto, a variável aleatória X que tem como função distribuição de probabilidade cumulativa $F(x)$, pode ser obtida através de: $X = F^{-1}(U) = \sqrt{U}$, $U \in [0, 1]$.

A seguir é apresentado, com base na técnica da transformada inversa, o processo de obtenção de geradores de números pseudoaleatórios, a partir das distribuições de probabilidade exponencial e normal (Billinton; Li, 1994).

(a) geração de números pseudoaleatórios exponencialmente distribuídos

Na distribuição exponencial, a função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (22)$$

Dessa forma, a função distribuição de probabilidade cumulativa correspondente é

expressa por $F(x) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda x}$. Pelo método da transformada inversa,

pode-se escrever, $U = F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$. Logo:

$$X = F^{-1}(U) = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-U) \quad (23)$$

Desde que a função $(1 - U)$ se distribui uniformemente da mesma forma que U no intervalo $[0, 1]$, então:

$$X = -\frac{1}{\lambda} \ln(U) \quad (24)$$

Onde U é uma sequência de números aleatória uniformemente distribuída em $[0, 1]$ e X segue a distribuição exponencial.

(b) geração de números pseudoaleatórios normalmente distribuídos

A função densidade de probabilidade de uma distribuição normal (gaussiana) padrão ($\mu = 0$ e $\sigma = 1$) é expressa por $f(z) = (1/2\pi) \cdot \exp [-(z^2/2)]$, cuja variável de transformação é dada por $z = (x - \mu)/\sigma$. Portanto, a geração de variáveis aleatórias com base nesta distribuição não poderá ser obtida pelo método da transformada inversa, desde que não existe a inversa da função distribuição de probabilidade cumulativa F . Contudo, a inversa da função F pode ser obtida por aproximação.

A inversa da função F pode ser aproximada pela seguinte expressão, com taxa máxima de erro absoluto menor do que $0,45 \times 10^{-4}$ (Billinton; Li, 1994):

$$z = t - \frac{\sum_{i=0}^2 c_i t^i}{1 + \sum_{i=1}^3 d_i t^i} \quad (25)$$

onde:

$$t = \sqrt{-2 \ln Q}$$

$$c_0 = 2,515517 \quad c_1 = 0,802853 \quad c_2 = 0,010328$$

$$d_1 = 1,432788 \quad d_2 = 0,189269 \quad d_3 = 0,001308$$

$$Q: \text{área sob a curva da função } f(z) \text{ a partir de um dado valor de } z \quad (26)$$

O algoritmo para a geração da variável aleatória normalmente distribuída segue os passos seguintes:

- Passo 1 - gerar a seqüência U de números aleatórios uniformemente distribuída no intervalo $[0, 1]$;
- Passo 2 - calcular a variável aleatória normalmente distribuída X através da seguinte relação:

$$X = \begin{cases} z, & \text{se } 0,5 < U \leq 1,0 \\ 0, & \text{se } U = 0,5 \\ -z & \text{se } 0 \leq U < 0,5 \end{cases}, \text{ onde } z \text{ é obtido a partir das equações (25) e (26).}$$

O valor de Q na equação (26) é obtido a partir de $Q = \begin{cases} 1-U, & \text{se } 0,5 < U \leq 1,0 \\ U, & \text{se } 0 \leq U \leq 0,5 \end{cases}$

Outros algoritmos para a determinação da função inversa de F (função distribuição de probabilidade cumulativa) pode ser visto em Robert; Casella (1999).

5. PROPOSTA DE AVALIAÇÃO DE PERIGO EM PISTAS DE ATERRISSAGEM PARALELAS

Neste capítulo é apresentada a proposta de avaliação de perigo de colisão entre duas aeronaves em operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas. O cenário da pesquisa é denominado de UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*), cujo espaçamento entre as pistas paralelas estão compreendidas entre 750 a 1500 pés (228,6 a 457,2m) (Houck; Powell, 2001). O conceito das métricas aplicável no setor aéreo é também abordado.

5.1. Métricas de Risco

O conceito do termo *medição* está diretamente relacionado com a operação de atribuição de um número ou medida; uma métrica é a interpretação do número designado. As medições são empregadas na quantificação de certos atributos tais como temperatura, velocidade, massa, aptidão, confiança do consumidor, entre outras. Os atributos em avaliação são as métricas. As operações aplicadas para quantificá-las são as medições. Portanto, pode-se definir métrica como uma medida quantitativa do grau em que um sistema, componente ou processo possui em relação a um dado atributo (Pressman, 2001).

A caracterização do perigo de acidentes no setor aéreo pode ser realizada por meio de várias métricas. No âmbito da ICAO (*International Civil Aviation Organization*), duas métricas de acidentes são bem conhecidas: colisão de uma aeronave com outra durante a fase em rota ou colisão entre aeronaves ou com obstáculos fixos durante a operação de aproximação/decolagem (Blom et al, 1998).

As métricas que podem ser utilizadas para descrever o perigo de acidentes no setor aéreo são apresentadas na Tabela 5.1 (FAA-EUROCONTROL, 1998).

Tab. 5.1 – Métricas Aplicáveis no Setor Aéreo

		ano
número de acidentes	por	hora de voo da aeronave
		aeronave-milha
número de acidentes fatais		passageiros
		passageiro-hora
número de fatalidades		passageiro-milha

Contudo, algumas métricas, por exemplo, *bank angle* ^(*) e aplicável na separação entre aeronaves devido às turbulências geradas por vórtices, não apresenta correlação da percepção em termos do perigo de colisão (Kos et al, 2000).

Uma métrica comumente utilizada para caracterizar o perigo de colisão entre aeronaves é expressa por *acidentes fatais por hora de voo*. Esta métrica é bastante útil, desde que a exposição individual ao perigo relaciona-se diretamente com o tempo gasto no voo. Contudo, para a escolha da métrica mais adequada para representar o fenômeno em análise, outros parâmetros devem ser considerados. Estes parâmetros são: o cenário em que ocorre o processo e a representatividade perante terceiros. Dessa forma, para colisões no ar (*mid air collisions*) de aeronaves em rota (*en-route*), a métrica apropriada deve estar representada por *horas de voo*. Porém, no caso de colisões entre aeronaves e aeronaves com obstáculos nas operações de aproximação/decolagem, a métrica mais apropriada deve estar relacionada com o *número de chegadas/partidas* (FAA-EUROCONTROL, 1998).

No modelo de avaliação de perigo proposto neste trabalho, além das métricas normalmente definidas para representar o cenário analisado (velocidade, proa, separação lateral, etc.), o parâmetro de interesse avaliado pelo modelo proposto corresponde ao *número de ocorrências de conflitos entre duas aeronaves*. Esta métrica representa o número de possíveis colisões entre duas aeronaves (referência e intrusa) nas operações de aproximação, sendo uma função da distância entre as linhas centrais das pistas de aterrissagem paralelas.

(*): ângulo entre o eixo normal da aeronave e o plano vertical da terra que contém o eixo longitudinal da aeronave. Este ângulo corresponde ao movimento de rotação que a aeronave executa no seu eixo longitudinal. Também chamado de *roll angle*.

5.2. Modelo de Avaliação de Perigo

A seguir são apresentados a descrição do modelo de avaliação de perigo, o modelo dinâmico das aeronaves em aproximação em pistas de aterrissagem paralelas e a descrição das variáveis aleatórias e determinísticas utilizadas na simulação. A avaliação de perigo proposta está inserida no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*).

5.2.1. Descrição do Modelo de Avaliação de Perigo

A ferramenta de avaliação de perigo é composta de um modelo dinâmico de duas aeronaves em operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas, onde uma delas é denominada aeronave de referência e a outra, de intrusa. O cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*) adotado corresponde às pistas de aterrissagem paralelas com espaçamento entre 750 a 1500 pés (228,6 a 457,2m).

Vale lembrar que, nas atuais operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas (CSPA), o controlador de tráfego aéreo (um para cada pista) deve garantir que cada aeronave permaneça na sua trajetória de aproximação designada (linha central estendida da pista), sendo de sua responsabilidade, evitar possíveis conflitos entre as duas aeronaves, assim como qualquer outra adjacente (Haines; Swedish, 1981) e (Morrow-Magyarits; Ozmore, 1999).

O modelo dinâmico do comportamento das duas aeronaves adotado neste trabalho é similar aos diversos tipos de algoritmos utilizados nas técnicas CD&R (*Conflict Detection and Resolution*), com respeito à detecção de conflitos. Genericamente, os algoritmos CD&R permitem sinalizar ao piloto, em tempo real, acerca de possíveis conflitos gerados pela perda de separação entre as aeronaves, possibilitando em tempo adequado, a tomada de decisão para as manobras corretivas.

A premissa de operação do algoritmo proposto neste trabalho não é em tempo real. O objetivo desta pesquisa é a avaliação do perigo inerente às operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas no cenário ditado pelos futuros sistemas de navegação aérea.

Algoritmos CD&R (*Conflict Detection and Resolution*) são modelos que permitem prever a posição da aeronave, em um futuro próximo, baseado na medida de sua posição atual e nas informações de sua intenção de vôo. Um dos principais elementos da predição é a modelagem das incertezas associada ao movimento da aeronave, através de distribuições de probabilidade de sua posição. Diversas variáveis aleatórias podem ser utilizadas para representar as incertezas na posição da aeronave. As mais comuns são as distribuições de probabilidade modeladas em termos de erros nos sensores dos equipamentos de navegação, habilidade do piloto em manter a trajetória nominal prevista, influência dos ventos, tempo de resposta do operador humano, entre outras (Lygeros; Prandini, 2002).

As distribuições de probabilidade consideradas no modelo proposto nesta pesquisa são as incertezas associadas na determinação da posição da aeronave intrusa e relacionada com a proa (*heading*), posição lateral, posição longitudinal e velocidade.

Neste trabalho, as trajetórias são geradas por meio de simulações pelo método de Monte Carlo, cujos resultados permitem estimar a probabilidade de conflito entre as duas aeronaves, de acordo com o espaçamento entre as pistas paralelas. Na simulação, a ocorrência do estado perigoso é caracterizada em termos da distância lateral entre as duas aeronaves, devido o desvio de uma delas (intrusa) em direção à trajetória da outra (referência). Esta ocorrência é definida como um evento *quase acidente* e, portanto, computado como uma situação crítica de conflito.

A distância lateral entre as aeronaves na situação crítica de conflito é denominada perda de separação lateral (*miss distance*). Este valor corresponde à mínima distância entre os centros de massa das duas aeronaves. O valor de 500 pés (152,4m) foi estabelecido nos primeiros estudos para a certificação de sistemas PRMs (*Precision Runway Monitor*) em pistas paralelas com espaçamento de 3.400 pés (1036,3m). Portanto, será considerado um evento *quase acidente*, em um determinado instante de tempo, caso a distância entre as duas aeronaves for menor que um valor de referência (perda de separação lateral ou *miss distance*) durante a operação de aproximação simultânea nas pistas paralelas, devido o desvio na rota da aeronave intrusa em direção à trajetória da aeronave de referência (Waller; Scanlon, 1999).

O cálculo da probabilidade de ocorrência do estado perigoso, para um determinado espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas, é calculado dividindo-se o número de ocorrências do estado perigoso pelo número de simulações.

O número de trajetórias a serem simuladas pelo método de Monte Carlo é realizado de forma intensiva, de acordo com o espaçamento entre as pistas paralelas. Isto é, quanto maior à distância entre as pistas de aterrissagem paralelas, menor o perigo associado e, por conseguinte, maior o número de simulações a serem realizadas. Esta afirmação pode ser visualizada da seguinte forma: considere, no plano, níveis de perigo representado por pontos p_i (i possibilidades) e q_j (j possibilidades) correspondentes aos espaçamentos L_i e L_j entre as pistas de aterrissagem paralelas, onde $L_i < L_j$ como ilustra a Figura 5.1.

Fig. 5.1 – Nível de Perigo x Número de Simulações

Desde que $L_i < L_j$, é natural que $p_i > q_j$, ou seja, o número que representa a possibilidade de conflito será tanto maior quanto menor o espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas. Portanto, quanto menor o número de pontos que representa o nível de perigo para o espaçamento entre as pistas em análise (no caso, L_j), maior o número de simulações para que esses pontos (q_j) sejam avaliados.

Intuitivamente, este comportamento pode ser mostrado em um gráfico em termos da probabilidade de ocorrência do estado perigoso e a distância entre as pistas paralelas como ilustra a Figura 5.2 (Kos et al, 2000).

Fig. 5.2 - Determinação de ALARP pela Curva de Perigo

Vale notar que, a partir da Figura 5.2, análises posteriores podem ser realizadas em termos de um valor aceitável de ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*) ou ainda, nível de segurança adequado, em função do espaçamento entre as pistas paralelas e dos critérios de aceitabilidade do perigo adotado pela agência reguladora responsável. Em outras palavras, esta curva pode ser utilizada como auxílio na análise da minimização da distância entre as pistas paralelas, de acordo com um nível mínimo de perigo ALARP (*As Low As Reasonable Practicable*) praticável.

5.2.2. Influência no Espaçamento entre as Pistas Paralelas

Diversos fatores afetam a operação de aproximação simultânea em pistas de aterrissagem paralelas. Os seguintes parâmetros podem influenciar no espaçamento entre as pistas paralelas, segundo (Haines; Swedish, 1981), (Shepherd et al, 1997), (Morrow-Magyarits; Ozmore, 1999), (Houck et al, 1999), (Waller; Scanlon, 1999), (Houck; Powell, 2000) e (Houck; Powell, 2001):

- Precisão dos auxílios automatizados (emissão de alarmes e telas);
- Erros nos sensores de navegação ou NSE (*Navigation Sensor Error*). O parâmetro NSE computa a precisão do sistema de navegação com relação à exatidão das informações fornecidas pelos sensores e pela resolução das telas. Estes erros estão relacionados aos atrasos e à taxa de atualização (taxa de varredura) do radar. Este parâmetro corresponde à diferença entre

a posição real da aeronave e a medida, sendo uma função exclusivamente do sistema de navegação.

- Erros técnicos de voo ou FTE (*Flight Technical Error*). Corresponde a medida de como o piloto (ou piloto automático) mantém a trajetória nominal prevista (controle da aeronave), sendo uma função primária do piloto ou do piloto automático.
- Erro total do sistema de navegação ou TSE (*Total System Error*). Indica a soma dos erros devido ao NSE e FTE. Podem originar-se devido a erros na trajetória a ser seguida (FTE), erros nos equipamentos de navegação da aeronave (NSE), erros no sinal do sistema de navegação ILS (*Instrument Landing System*)^(*) e/ou condições meteorológicas.
- Área de captura do localizador ILS. Corresponde ao limite para a sintonia (*tracking*) da linha central estendida da pista, a partir da referência da pista (*threshold*). Este limite está situado até 12 milhas náuticas (22.236m), sendo devido à natureza angular do feixe rádio do sistema ILS. Veja ilustração na Figura 5.3.
- Zona de operação normal (NOZ - *Normal Operating Zone*). Corresponde ao espaço aéreo onde a aeronave deve permanecer durante a operação de aproximação. O espaço aéreo das pistas de aproximação paralelas é dividido em duas áreas: a zona de operação normal NOZ (*Normal Operating Zone*) e a zona de não transgressão NTZ (*No Transgression Zone*), esta última com uma largura de 2.000 pés (609,6m) entre os pontos médios das pistas, onde não é permitido o tráfego de aeronaves. Desde que a dimensão de NTZ é fixa, a área NOZ varia de acordo com a separação das pistas paralelas. Desse modo, à medida que a separação entre as pistas diminui, NOZ também diminui, provendo menos espaço aéreo para a aeronave trafegar ao longo do sinal do sistema de navegação ILS e, portanto, com grandes possibilidades para uma aeronave invadir a área NTZ. O parâmetro NOZ está relacionado com erros devido ao TSE.

(*): Sistema de aterrissagem por instrumentos que provê ao piloto um caminho de aproximação perfeitamente alinhado com a linha central da pista. O sistema ILS é basicamente composto por dois componentes: *localizer beam* que provê ao piloto a guia lateral e o *glideslope beam* como a guia vertical.

- Desvio lateral. Corresponde ao desvio máximo em relação à linha central estendida da pista, a partir do ponto de referência (*threshold*) até em torno de 10 milhas náuticas (18.530m). Pela utilização de equipamento adequado embarcado na aeronave, por exemplo, AILS ^(*) (*Airborne Information for Lateral Spacing*) em um ambiente WAAS ^(**) (*Wide Area Augmentation System*) ou LAAS ^(***) (*Local Area Augmentation System*), pode-se chegar a valores bem menores daqueles fornecidos pelos sistemas convencionais ILS. Dessa forma, pode-se incorporar limites aceitáveis no desvio lateral, a partir da linha central estendida da pista, pela utilização de sistemas baseados em sinais de satélites, reduzindo esses limites e evitando áreas potenciais de sobreposição, ao contrário dos desvios encontrados no localizador ILS convencional. Estes sistemas permitem formar um *corredor de aproximação* mais estreito. Veja ilustração na Figura 5.3.
- Zona de detecção. Parâmetro que leva em consideração o sistema de vigilância e a observação (detecção), pelo controlador de tráfego aéreo, quando uma aeronave ultrapassa os limites da zona de operação normal NOZ (*Normal Operating Zone*). Este parâmetro está relacionado com as inexatidões e os atrasos no processo que determinam se realmente a zona de operação normal foi violada.
- Perda de separação lateral (*miss distance*). Corresponde ao valor mínimo de separação lateral entre as aeronaves para a definição do evento de conflito. Este parâmetro corresponde à distância de referência mínima entre as duas aeronaves, quando da ocorrência do evento *quase acidente*.

(*): Tecnologia desenvolvida conjuntamente pela NASA e indústrias. Sistema embarcado na aeronave que permite aproximações seguras mais próximas entre aeronaves do que o atualmente utilizado por instrumentos convencionais (acima de 2.500 pés de separação). O display de um sistema AILS mostra ao piloto o tráfego da vizinhança. Tem como suporte tecnológico o uso de sinais de satélite tipo GPS (*Global Positioning System*).

(**): Tecnologia de aumentação que melhora a precisão, integridade e disponibilidade do sinal GPS (*Global Positioning System*) sobre uma área, em geral sobre um país. Esta tecnologia permite o uso do sinal GPS como forma primária de navegação em rota como também nas operações de aproximação de precisão categoria I.

(***): Tecnologia de aumentação complementar ao WAAS (*Wide Area Augmentation System*) que permite suportar operações de aproximação de precisão categorias II e III. Poderá suportar a facilidade de aproximação categoria I em localidades onde o sistema de aumentação WAAS não esteja disponível. Sua operação é similar ao WAAS, mas as informações de navegação são transmitidas diretamente a partir de uma estação terrena à aeronave localizada dentro de uma área de 30 milhas náuticas (55.590m) centrada na estação LAAS.

- Atrasos (*time delay*). Os atrasos são dependentes de vários fatores, tais como a taxa de atualização do radar de vigilância, tempo de resposta do controlador, tempo de reação do piloto, tempo de atraso na emissão do alerta, entre outros. Como exemplo de influência do atraso, suponha radares de vigilância convencional do tipo ASR (*Airport Surveillance Radar*), classes 7 ou 9 com taxa de varredura de 4,8 segundos. Neste caso, a aproximação de uma aeronave a 140 nós (259,4km/h), pode levá-la a percorrer a distância de 1.000 pés (304,8m) até a próxima atualização do radar ou 2.000 pés (609,6m), se a próxima varredura for perdida. Portanto, este atraso pode conduzir uma das aeronaves em direção à trajetória da vizinha, sem que o controlador de tráfego aéreo perceba do fato antes de 10 segundos depois ^(*).
- Zona de correção. Parâmetro que define a conclusão da manobra de escape pela aeronave de referência. Este parâmetro leva em consideração o tempo para que a aeronave de referência reaja ao comando de manobra e alcance um curso desejado em relação à aeronave intrusa.
- Influência dos ventos e turbulências.

A Figura 5.3 ilustra alguns dos parâmetros que influenciam o espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas descritos anteriormente (Waller; Scanlon, 1999).

(*) : 1nó = 6080 pés/hora $\cong$ 1,689 pés/seg. Portanto, $\Delta s = v \cdot \Delta t = (140 \times 1,689) \times (9,6) \cong 2270$ pés

Fig. 5.3 - Operação de Aproximação em Pistas de Aterrissagem Paralelas

5.2.3. Modelo Dinâmico das Aeronaves

O modelo de predição de conflito utilizado neste trabalho é o método da estimativa da trajetória para duas aeronaves em duas dimensões (Watkins; Lygeros, 2002). As diferentes abordagens e técnicas utilizadas nos algoritmos de detecção e resolução de conflitos, CD&R (*Conflict Detection and Resolution*), podem ser vistas no levantamento realizado em Kuchar; Yang (2000).

A Figura 5.4 ilustra a abordagem adotada no modelo de avaliação de perigo proposto. Neste caso, são consideradas as seguintes variáveis:

$u_j(t)$, $v_j(t)$: velocidade da aeronave de referência e intrusa;

β_k : proa (*heading*) da aeronave intrusa;

Q_j , P_j : pontos representativos nas trajetórias da aeronave de referência e intrusa;

q_j , p_j : posição nominal da aeronave de referência e intrusa;

s : distância nominal entre dois pontos P_{j-1} e P_j correspondente à aeronave intrusa;

L : espaçamento entre as linhas centrais das pistas de aterrissagem paralelas;

i , j : vetores unitários dos eixos x e y .

Fig. 5.4 - Modelo de Detecção de Conflito

A predição da posição das aeronaves é construída a partir do modelo descrito a seguir. Considere genericamente a trajetória da aeronave intrusa modelada em uma série de pontos $\{P_j\}_{j=0,\dots,n}$, com $P_j \in \mathbb{R}^2$ e, uma sequência de velocidades $\{v_j\}_{j=0,\dots,n}$, com $v_j \in \mathbb{R}^+$, indicativo do movimento desses pontos. A principal fonte de incerteza é aquela devida à perturbação do movimento da aeronave ao longo do tempo. Para a estimativa da posição nominal $p(t)$ em qualquer instante, o tempo de chegada nominal em cada ponto P_j é calculado recursivamente por:

$$T_j = \frac{\|\vec{P}_j - \vec{P}_{j-1}\|}{\|\vec{v}_j\|} + T_{j-1} \quad (1)$$

iniciando-se com o tempo corrente T_0 .

A distância nominal $s(t) \in \mathbb{R}^+$ correspondente à distância entre dois pontos P_{j-1} e P_j , pode ser calculada pela seguinte expressão de forma recursiva:

$$\vec{s}(t) = \vec{v}_j \cdot (t - T_{j-1}) + \vec{s}(T_{j-1}) \quad (2)$$

Desde que, $\vec{s}(T_{j-1}) = \vec{s}(T_0) = 0$ para $t = T_{j-1}$ e $\vec{v}_j(t) = \|\vec{v}_j\| \cdot (\vec{i} \cos \beta_k + \vec{j} \sin \beta_k)$

$$\text{então, } \vec{s}(t) = \|\vec{v}_j\| \cdot (t - T_{j-1}) \cdot (\vec{i} \cos \beta_k + \vec{j} \sin \beta_k) \quad (3)$$

Portanto, a posição nominal da aeronave intrusa $p(t) \in \mathbb{R}^2$ pode ser calculada por:

$$\vec{p}(t) = \vec{p}(T_{j-1}) + \vec{s}(t) \quad (4)$$

Substituindo a expressão (3) em (4), tem-se:

$$\vec{p}(t) = \vec{p}(T_{j-1}) + \left\| \vec{v}_j \right\| \cdot (t - T_{j-1}) \cdot (\vec{i} \cos \beta_k + \vec{j} \sin \beta_k) \quad (5)$$

Porém, a direção da trajetória nominal da aeronave intrusa e os vetores unitários $\vec{i}$ e $\vec{j}$ estão relacionados por:

$$\vec{i} \cos \beta_k + \vec{j} \sin \beta_k = \frac{\vec{P}_j - \vec{p}(T_{j-1})}{\left\| \vec{P}_j - \vec{p}(T_{j-1}) \right\|} \quad (6)$$

Portanto, substituindo (6) em (5), tem-se:

$$\vec{p}(t) = \vec{p}(T_{j-1}) + \frac{\left\| \vec{v}_j \right\| \cdot (t - T_{j-1}) \cdot [\vec{P}_j - \vec{p}(T_{j-1})]}{\left\| \vec{P}_j - \vec{p}(T_{j-1}) \right\|} \quad (7)$$

com $j = 1, \dots, n$ e iniciando com $s(T_0) = 0$ e $p(T_0) = P_0$.

De modo análogo, pode-se escrever as mesmas equações anteriores para a aeronave de referência. Neste caso, $q(t)$, u_j e Q_j representam respectivamente, a posição nominal, a velocidade e pontos na trajetória da aeronave de referência. Portanto:

$$\vec{q}(t) = \vec{q}(T_{j-1}) + \frac{\left\| \vec{u}_j \right\| \cdot (t - T_{j-1}) \cdot [\vec{Q}_j - \vec{q}(T_{j-1})]}{\left\| \vec{Q}_j - \vec{q}(T_{j-1}) \right\|} \quad (8)$$

O algoritmo consiste em prever a posição das aeronaves em um futuro próximo, levando em consideração certos fatores de incertezas. O objetivo do algoritmo é determinar o número de ocorrências de possíveis conflitos, de acordo com um valor de separação lateral mínima (*miss distance* - MD), entre as trajetórias das duas aeronaves em função da distância entre as pistas paralelas. Portanto, a ocorrência do conflito será caracterizada quando a seguinte relação for satisfeita:

$$\left\| \vec{q}(t) - \vec{p}(t) \right\| < MD \quad (9)$$

Os fatores de incerteza adotados neste modelo, dependendo do parâmetro considerado, são admitidos na forma da distribuição normal (gaussiana) ou uniforme, cujos dados foram utilizados em outros estudos e disponíveis em Carpenter; Kuchar (1997), Waller; Scanlon (1999), Houck; Powell (2000), Houck; Powell (2001). O motivo da adoção das distribuições de probabilidade utilizado pelos autores citados é que refletem, de forma abrangente, o cenário do setor em direção aos futuros sistemas de navegação aérea.

As variáveis aleatórias descritas a seguir são utilizadas no modelo de avaliação de perigo proposto. Estas variáveis caracterizam, em termos de distribuições de probabilidade, as incertezas na localização da aeronave intrusa. As variáveis determinísticas referem-se à velocidade da aeronave de referência e o parâmetro indicador de ocorrência de conflito (perda de separação lateral):

A) Variáveis aleatórias (média μ e desvio padrão σ):

- Posição lateral: distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 35$ pés (10,7m). Este desvio corresponde à precisão do sistema DGPS (*Differential Global Positioning System*) (Carpenter; Kuchar, 1997).
- Posição relativa longitudinal: distribuição uniforme com separação de 1.000 pés (304,8m), modelado com ± 500 pés (500 pés antes e 500 pés depois da aeronave de referência) (Houck; Powell, 2001).
- Velocidade: distribuição uniforme com extremos $v_{\text{mínima}} = 110$ nós (203,8km/h) e $v_{\text{máxima}} = 170$ nós (315,0km/h). Outros autores assumem algumas variações nos valores de $v_{\text{mínima}}$ e $v_{\text{máxima}}$ (Carpenter; Kuchar, 1997), (Waller; Scanlon, 1999).
- Proa (*heading*): distribuição normal com $\mu = 0^\circ$ e $\sigma = 2,5^\circ$. A faixa de variação considerada é de -40° a $+40^\circ$ com incremento em passos de 10° , segundo Chamberlain; Koczo (1995) apud Carpenter; Kuchar (1997).
- Turbulências. Segundo Chamberlain; Koczo (1995) apud Carpenter; Kuchar (1997), a magnitude dessas incertezas foram estimadas sob diversas condições de turbulências e incluídas na distribuição adotada com referência ao parâmetro de proa (*heading*).

B) Variáveis determinísticas:

- Velocidade da aeronave de referência: constante e igual 140 nós (259,4km/h) (Houck; Powell, 2000).
- Perda de separação (*miss distance*): valor de referência adotado igual a 500 pés ^(*) (152,4m) (Waller; Scanlon, 1999).

(*): Segundo o FAA-EUROCONTROL (1998), esta referência de 500 pés representa um valor “generoso”, desde que uma aeronave do tipo C-8 Galaxy possui envergadura de 223 pés (67,9m) e comprimento de 248 pés (75,6m), enquanto que um Boeing 747, uma envergadura de 195,68 pés (59,6m).

5.3. Passos na Implementação do Algoritmo

O modelo de avaliação de perigo proposto consiste de vários passos. A sequência de passos será diversas vezes repetida, levando-se em consideração todas as combinações de valores dos parâmetros assumidos (caracterizados pelas distribuições de probabilidade e parâmetros fixos adotados) que influenciam na operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas.

O modelo de avaliação de perigo é composto dos seguintes passos:

- Passo 1: executar a simulação da trajetória de cada aeronave em função do espaçamento entre as pistas paralelas através do método de Monte Carlo.
- Passo 2: aplicar o algoritmo de detecção de conflito, levando em consideração as incertezas na determinação da posição da aeronave intrusa, através da introdução de erros aleatórios em cada posição ao longo de sua trajetória. As incertezas introduzidas são: proa (*heading*), velocidade, posição lateral e posição longitudinal.
- Passo 3: estimar o nível de perigo, em termos das trajetórias das aeronaves, comparando com o valor de referência *perda de separação lateral*.
- Passo 4: caso o algoritmo retorne como situação crítica de conflito (evento *quase-acidente*), computar como evento perigoso.
- Passo 5: repetir os passos anteriores.

O pseudocódigo do modelo de avaliação de perigo proposto neste trabalho, supondo um determinado espaçamento (L) entre as pistas de aterrissagem paralelas, é apresentado a seguir:

Dados de entrada: número de testes a serem realizados e espaçamento entre as pistas paralelas;

Para cada teste de 1 a N;

Para cada instante de tempo (0 a T);

Gerar números pseudoaleatórios uniformemente distribuídos em [0,1]: rd1, rd2, rd3, rd4, rd5;

Escolher ângulo de proa intermediário (HE) entre -40° a 40° (passos de 10°), a partir de rd1;

Calcular o valor da proa (H) e as incertezas associadas: $H = HE + \text{normal_inv}(\text{rd2}, \mu_H, \sigma_H)$;

Introduzir as incertezas na velocidade: $v = v_{\min} + (v_{\max} - v_{\min}) * \text{rd3}$;

Introduzir as incertezas na separação longitudinal: $\text{long} = \text{long}_{\min} + (\text{long}_{\max} - \text{long}_{\min}) * \text{rd4}$;

Introduzir as incertezas na separação lateral: $lat = normal_inv(rd5, \mu_{lat}, \sigma_{lat})$;
 Calcular a posição da aeronave de referência: $Q(t) = u*t$;
 Assumir posição da aeronave de referência na origem quando $t = 0$: $Q(0) = 0$;
 Calcular a posição da aeronave intrusa (eixo x): $P_x(t) = pos_x(t, v, H, long, lat)$;
 Calcular a posição da aeronave intrusa (eixo y): $P_y(t) = pos_y(t, v, H, long, lat)$;
 Assumir posição da aeronave intrusa alinhada à sua pista quando $t = 0$: $P_y(0) = -L$;
 Calcular o parâmetro identificador de perigo: $calc_conf(t) = \sqrt{[P_x(t) - Q(t)]^2 + [P_y(t)]^2}$;
 Se o parâmetro $calc_conf(t) < MD$ (*miss distance* ou perda de separação lateral);
 Incrementar o contador de eventos de conflito: $ACC = ACC + 1$;
 Parar a simulação no tempo e iniciar o próximo teste;
 Caso contrário, continuar a simulação no tempo;
 Caso tenha esgotado os intervalos de tempo ($t \leq T$), iniciar novo teste;
 Caso todos os testes tenham sido executados (número de testes = N);
 Calcular o nível de perigo para o espaçamento especificado: $PH_L = ACC/(N)$;
 Fim do programa.

Onde:

N: número de simulações a serem realizadas.

T: instante de tempo para a aeronave de referência atingir o ponto inicial da sua pista de aterrissagem (*threshold*).

rd_i : números pseudoaleatórios uniformemente distribuídos em $[0,1]$.

HE: valor intermediário da proa (*heading*) da aeronave intrusa.

H: proa da aeronave intrusa após a consideração das incertezas.

$normal_inv$: função inversa da distribuição de probabilidade gaussiana.

μ_H, σ_H : média e desvio padrão da distribuição normal correspondente à proa.

u: velocidade da aeronave de referência (valor constante).

v: velocidade da aeronave intrusa (v_{min} e v_{max} : velocidade mínima e máxima admitida de acordo com os parâmetros definidos pela distribuição de probabilidade).

long: separação longitudinal da aeronave intrusa ($long_{min}$ e $long_{max}$: separação longitudinal mínima e máxima admitida de acordo com os parâmetros definidos pela distribuição de probabilidade).

lat: separação lateral da aeronave intrusa.

μ_{lat}, σ_{lat} : média e desvio padrão da distribuição normal correspondente à separação lateral da aeronave intrusa.

Q: posição da aeronave de referência (eixo x).

P_x, P_y : posição da aeronave intrusa (eixos x e y). As expressões correspondentes à P_x e P_y são determinadas de acordo com as equações (18) e (19) apresentadas no item 5.4 a seguir. Estas equações são referenciadas como pos_x e pos_y no pseudocódigo.

pos_x, pos_y : rotina para o cálculo das incertezas associadas à posição da aeronave intrusa (variáveis $P_x(t)$ e $P_y(t)$) com referência aos eixos x e y .

$pos_x = v \cdot \cos(H) \cdot t - (long) \cdot \cos(H) - (lat) \cdot \sin(H)$.

$pos_y = -L + v \cdot \sin(H) \cdot t - (long) \cdot \sin(H) - (lat) \cdot \cos(H)$.

$calc_conf$: parâmetro identificador de conflito (evento *quase-acidente*).

$sqrt$: raiz quadrada.

MD : *miss distance* (parâmetro perda de separação lateral entre as aeronaves).

ACC : acumulador de registro de eventos perigosos (situações de conflito).

PH_L : valor do nível do perigo simulado correspondente ao espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas especificado.

5.4. Posicionamento da Aeronave Intrusa

As equações $P_x(t)$ e $P_y(t)$ que representam o movimento da aeronave intrusa podem ser obtidas, por geometria, a partir do diagrama apresentado na Figura 5.5.

Neste diagrama, L indica o espaçamento entre as pistas paralelas, H a indicação da proa com incertezas, a partir da proa nominal HE e sep_long e sep_lat as incertezas associadas à trajetória da aeronave intrusa nos eixos longitudinal (separação longitudinal) e normal (separação lateral).

Fig. 5.5 – Determinação do Posicionamento das Aeronaves

A partir dos triângulos ABC e CDE da Figura 5.5 são obtidos as seguintes relações:

$$a = (\text{sep_long}) \cdot \text{senH} \quad (10)$$

$$b = (\text{sep_long}) \cdot \text{cosH} \quad (11)$$

$$c = (\text{sep_lat}) \cdot \text{cosH} \quad (12)$$

$$d = (\text{sep_lat}) \cdot \text{senH} \quad (13)$$

Portanto, pode-se calcular as expressões:

$$a - c = (\text{sep_long}) \cdot \text{senH} - (\text{sep_lat}) \cdot \text{cosH} \quad (14)$$

$$b + d = (\text{sep_long}) \cdot \text{cosH} + (\text{sep_lat}) \cdot \text{senH} \quad (15)$$

As coordenadas $P_x(t)$ e $P_y(t)$ podem ser expressas por:

$$P_x(t) = (v \cdot \text{cosH}) \cdot t - (b + d) \quad (16)$$

$$P_y(t) = - [L - (v \cdot \text{senH}) \cdot t - (a - c)] \quad (17)$$

Substituindo as expressões (14) e (15) tem-se finalmente:

$$P_x(t) = (v \cdot \cos H) \cdot t - (\text{sep_long}) \cdot \cos H - (\text{sep_lat}) \cdot \sin H \quad (18)$$

$$P_y(t) = -L + (v \cdot \sin H) \cdot t + (\text{sep_long}) \cdot \sin H - (\text{sep_lat}) \cdot \cos H \quad (19)$$

Algumas considerações são adotadas no modelo proposto. No início de cada iteração do algoritmo de detecção do conflito é assumido um horizonte de predição onde todos os parâmetros considerados são amostrados aleatoriamente em função do espaçamento entre as pistas paralelas no cenário UCSPA (entre 700 a 1.500 pés com passos de 100 pés). Nestas condições, as seguintes condições iniciais são assumidas:

- Para a aeronave de referência: no instante inicial, $t = 0$ ($t = T_o$), a distância (s^r) e posição nominal (q^r) são $s^r(T_o) = 0$ e $q^r(T_o) = 0$. Em termos do pseudocódigo, $Q(t = 0) = 0$. Portanto, a aeronave de referência está posicionada na origem do sistema de coordenadas no instante inicial.
- Para a aeronave intrusa: no instante inicial, $t = 0$ ($t = T_o$), a distância (s^i) e a posição nominal (p^i) são $s^i(T_o) = 0$ e $p^i(T_o) = P_o = L$, de forma que a relação de verificação de conflito, $\|\vec{q}(T_o) - \vec{p}(T_o)\| \geq MD$ (*miss distance* ou perda de separação lateral) seja satisfeita no instante inicial. Portanto, é admitido que não há conflito no instante inicial. Neste caso, a aeronave intrusa está posicionada em $(0, -L)$ no sistema de coordenadas, onde L é o espaçamento entre as pistas paralelas. Em relação ao pseudocódigo, tem-se que $P_x(t = 0) = 0$ e $P_y(t = 0) = -L$.
- Inicialmente (no instante $t = 0$), as duas aeronaves estão estabelecidas no segmento final de aproximação, em torno de 12 milhas náuticas (22.236m), a partir do início das pistas paralelas e co-altitudes.

6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Este capítulo é reservado para a apresentação dos resultados obtidos na simulação por meio do modelo de análise de perigo proposto. Análises e inferências a partir dos resultados obtidos são também discutidas.

6.1. Resultados Alcançados

O ambiente utilizado na programação e simulação do modelo de análise de perigo proposto foi implementado em um PC Pentium III – 750 MHz, 128 MB SDRAM, HD 20 GB e sistema operacional Windows 2000 através da linguagem MATLAB, versão 6 (R12). O motivo da escolha da linguagem de programação MATLAB deve-se aos recursos e sub-rotinas disponíveis em sua biblioteca, principalmente no que se refere ao gerador de números pseudoaleatórios de alta qualidade (período teórico da ordem de 10^{450}) e da função inversa da distribuição de probabilidade gaussiana, recursos estes imprescindíveis para a obtenção de resultados confiáveis, de acordo com o método utilizado na simulação (Monte Carlo).

A avaliação da probabilidade de ocorrência das situações críticas de conflito, no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*), é determinada pela simulação das trajetórias das aeronaves através do método de Monte Carlo, em função da separação entre as pistas de aterrissagem paralelas.

A caracterização das situações críticas de conflito é devido à perda de separação lateral entre as aeronaves. Esta perda na separação lateral corresponde ao desvio na rota da aeronave intrusa em direção à trajetória da aeronave de referência. Na determinação da posição da aeronave intrusa são consideradas incertezas, na forma de distribuições de probabilidades, como apresentados no capítulo 5, item 5.2.3.

A Tabela 6.1 ilustra estes resultados, onde N é o número de testes, L o espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas e PH, a avaliação do nível de perigo associado (probabilidade de perigo) em função de L.

Tab. 6. 1 – Resultados obtidos pelo Modelo de Análise de Perigo Proposto

L (pés) (espaçamento)	N (nº testes)	PH (probabilidade de perigo)
700	1.000	$4,7500 \times 10^{-1}$
	10.000	$4,6660 \times 10^{-1}$
	100.000	$4,7380 \times 10^{-1}$
800	1.000	$3,1900 \times 10^{-1}$
	10.000	$3,3390 \times 10^{-1}$
	100.000	$3,3369 \times 10^{-1}$
900	1.000	$2,0900 \times 10^{-1}$
	10.000	$2,1650 \times 10^{-1}$
	100.000	$2,1235 \times 10^{-1}$
1.000	1.000	$1,2200 \times 10^{-1}$
	10.000	$1,2240 \times 10^{-1}$
	100.000	$1,1634 \times 10^{-1}$
1.100	1.000	$5,1000 \times 10^{-2}$
	10.000	$4,4700 \times 10^{-2}$
	100.000	$5,0510 \times 10^{-2}$
1.200	1.000	$1,7000 \times 10^{-2}$
	10.000	$1,9300 \times 10^{-2}$
	100.000	$1,8140 \times 10^{-2}$
1.300	1.000	$6,0000 \times 10^{-3}$
	10.000	$3,9000 \times 10^{-3}$
	100.000	$3,9800 \times 10^{-3}$
1.400	1.000	0
	10.000	$7,0000 \times 10^{-4}$
	100.000	$4,4000 \times 10^{-4}$
1.500	1.000	0
	10.000	0
	100.000	0

Como esperado, os dados apresentados na Tabela 6.1 indicam que, quanto menor o espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas, maior o nível de perigo associado. Outros detalhes que podem ser observados são os resultados obtidos para os espaçamentos de 1.400 e 1.500 pés entre as pistas paralelas. Em ambos os casos, uma quantidade maior de testes é necessária: no primeiro, pela necessidade de convergência, dada a grande diferença nos valores encontrados e, no segundo, a indicação de que um baixo nível de perigo pode estar associado. Estes fatos podem ser vistos na Tabela 6.2 para 500.000 simulações.

Tab. 6.2 – Nível de Perigo nas Operações UCSPA para 500.000 simulações

L (pés) (espaçamento)	PH (%) (probabilidade de perigo)
700	47,268
800	33,519
900	21,185
1.000	11,421
1.100	5,2058
1.200	1,7888
1.300	0,4160
1.400	0,0442
1.500	0,0008

A tendência na diminuição do nível de perigo, de acordo com o aumento no espaçamento entre as pistas paralelas, pode ser vista no gráfico “Probabilidade de Perigo de Colisão (PH) em função do Espaçamento entre as Pistas Paralelas (L).”

A Figura 6.1 ilustra esta curva a partir dos dados apresentados na Tabela 6.2, onde são consideradas 500.000 simulações para cada espaçamento entre as pistas paralelas (700 a 1.500 pés, em passos de 100 pés).

Fig. 6.1 – Probabilidade de Perigo de Colisão x Espaçamento entre as Pistas Paralelas

6.2. Análise dos Resultados

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.2 ou Figura 6.1, pode-se estimar o espaçamento mínimo (ou adequado) entre as pistas de aterrissagem paralelas em relação a um nível de segurança correntemente aceito ou regulamentado.

Em outras palavras, caso os resultados obtidos na simulação sejam transformados em termos de um nível de segurança de forma que valor transformado seja menor do que uma referência previamente estabelecida (ou aceita), então o espaçamento analisado será aceitável e sujeito a um determinado nível de perigo. Como parâmetro de nível de segurança aceitável, pode-se utilizar a frequência ou taxa tolerável de aeronaves intrusas não recuperáveis^(***) permitidas nas operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas (Houck; Powell, 2001).

(*): É utilizado a interpolação linear. Neste caso, os valores intermediários estão sobre uma linha reta entre os pontos definidos.

(**): Interpolação que utiliza polinômios cúbicos que mais se aproximam da curva entre cada par de pontos dados.

(***): Neste trabalho, aeronaves intrusas não recuperáveis referem-se ao conceito de *blunders*. Indicam ocorrências de aeronaves intrusas que podem resultar em acidentes.

Segundo Lankford et al (2000) e a *Federal Aviation Administration* (FAA) (1991) apud Houck; Powell (2001), no programa de desenvolvimento do sistema PRM (*Precision Runway Monitor*), a FAA adotou a seguinte metodologia, descrita a seguir, para estimar a taxa aceitável de acidentes nas operações de aproximação sob instrumentos ILS (*Instrument Landing System*) e condições meteorológicas por instrumentos IMC (*Instrument Meteorological Conditions*) no cenário CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*). Esta taxa é denominada de Nível Objeto de Segurança ou *Target Level of Safety* (TLS) (Magyarits; Ozmore, 2002).

A partir de dados obtidos nas operações CSPA ocorridas no período de 1983 a 1988 nos EUA, dois acidentes ocorreram em um total de 5 milhões de aproximações. Dessa forma, a taxa de acidente pode ser expressa por “1 acidente em 2,5 milhões de aproximações”. Além disso, foram identificadas 9 causas potenciais de acidentes durante as aproximações finais, cujas origens podem estar relacionadas, por exemplo, à falhas estruturais e de equipamentos. Como décima causa, foi identificada uma aeronave intrusa durante as aproximações com o sistema PRM.

Portanto, caso a taxa de acidente corrente de 1 em 2,5 milhões de aproximações seja mantida, a contribuição da aeronave intrusa no cômputo dessa taxa corresponde a um décimo do total. Dessa forma, a taxa de acidente devido somente à aeronave intrusa, durante as operações com o sistema PRM, não pode ser maior do que *1 acidente em 25 milhões de aproximações*, ou seja,

$$TLS = \frac{1 \text{ acidente}}{25 \text{ milhões aproximações}} = 4.10^{-8} \text{ acidentes / aproximações} \quad (1)$$

Como parâmetro de comparação para estimar o espaçamento mínimo aceitável entre as pistas paralelas será utilizado o número máximo de aeronaves intrusas não recuperáveis permitidas nas operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas. Na literatura técnica, as aeronaves intrusas não recuperáveis são denominadas de *blunders* e indica uma ocorrência não esperada, pelo controlador de tráfego aéreo, de aeronaves intrusas que podem resultar em situações potenciais de conflito. Tecnicamente, indica uma situação onde o ângulo de proa (*heading*) da trajetória da aeronave intrusa, em relação à linha estendida da sua pista, é de 30°.

Assumindo que a perda de separação lateral (MD – *Miss Distance*) no modelo de avaliação de perigo proposto irá resultar em um conflito (colisão), a probabilidade de ocorrência de acidentes pode ser expressa matematicamente através da seguinte expressão (Magyarits; Ozmore, 2002):

$$P(\text{acidente}) = P(\text{MD} \cap \text{INT} \cap \text{INT}_{\text{ac}} \cap \text{BL}) \times 2 \times 1/2 \quad (2)$$

onde:

- MD: perda de separação lateral (*miss distance*);
- INT: ocorrência de aeronave intrusa;
- INT_{ac} : ocorrência de aeronave intrusa com alinhamento crítico em relação a aeronave em aproximação na pista adjacente;
- BL: ocorrência de aeronave intrusa não recuperável (*blunder*)
- $P(\text{MD} \cap \text{INT} \cap \text{INT}_{\text{ac}} \cap \text{BL})$: probabilidade onde todos os eventos relevantes ocorrem simultaneamente, ou seja, intrusões que resultam na perda de separação lateral entre as duas aeronaves.
- Fator 2: indicação da ocorrência de dois acidentes por colisão.
- Fator 1/2: desde que duas aeronaves executam a aproximação de forma independente e simultânea nas operações CSPA, cada operação CSPA é computada como duas aproximações.

Desenvolvendo a expressão (2), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} P(\text{acidente}) = & P(\text{MD} / \text{INT} \cap \text{INT}_{\text{ac}} \cap \text{BL}) \times \\ & P(\text{INT} / \text{INT}_{\text{ac}} \cap \text{BL}) \times \\ & P(\text{INT}_{\text{ac}} / \text{BL}) \times \\ & P(\text{BL}) \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

- $P(\text{MD} / \text{INT} \cap \text{INT}_{\text{ac}} \cap \text{BL})$: probabilidade de perda da separação lateral entre as aeronaves, dado que uma intrusão tenha ocorrido. Esta probabilidade é a estimativa calculada pelo modelo de avaliação de perigo proposto (PH).
- $P(\text{INT} / \text{INT}_{\text{ac}} \cap \text{BL})$: probabilidade de que a pior situação de intrusão ocorra pelo alinhamento crítico da aeronave intrusa com relação à aeronave na pista

adjacente. Desde que o modelo de avaliação de perigo proposto assume as duas aeronaves co-altitudes a partir da referência das pistas (*threshold*) e até 12 milhas náuticas onde se inicia a operação de aproximação, a probabilidade admitida neste caso será 100% (pior caso).

- $P(INT_{ac} / BL)$: probabilidade de que uma aeronave intrusa seja o pior caso de intrusão (aeronave intrusa não recuperável ou *blunder*). A probabilidade é desconhecida, mas análises com sistemas radares PRM (*Precision Runway Monitor*) indicam uma estimativa aproximada de 1/100, ou seja, a frequência de aeronaves em curso de intrusão que não são recuperáveis. Nessas condições, de cada 100 ocorrências, 99 delas são identificadas e o piloto da aeronave intrusa corrige sua rota antes que a aeronave adjacente execute a manobra de escape (FAA, 1991).
- $P(BL)$: probabilidade de que uma efetiva intrusão não recuperável (*blunder*) ocorra durante a aproximação simultânea por instrumentos. Esta taxa é desconhecida, mas pesquisadores estimam não ser maior do que 1 *blunder* (intrusão a 30°) por 1000 pares de aproximações ou ainda, 1 *blunder* (intrusão a 30°) a cada 2000 aproximações.

Neste trabalho, para efeito de estimativa do espaçamento mínimo aceitável entre as pistas de aterrissagem paralelas é utilizada esta taxa, de forma que:

$$NPB_{livre} = 1/P(BL) \leq 2000, \quad (4)$$

onde NPB_{livre} indica o número de intrusões não recuperáveis (*blunders*) que podem ocorrer livremente durante as operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas.

Vale observar que, o valor máximo permitido de intrusões não recuperáveis (*blunders*) que podem ocorrer livremente ($NPB_{livre} \leq 2000$), corresponde ao valor adotado pela FAA (*Federal Aviation Administration*), segundo Lankford, et al (2000) apud Houck; Powel (2001).

Portanto, dado o Nível Objeto de Segurança (TLS), então a partir da relação (1), pode-se escrever: $TLS = P(\text{acidente}) = 4 \cdot 10^{-8}$ acidentes/aproximações.

Substituindo na relação (3) tem-se:

$$4 \cdot 10^{-8} = \frac{P(MD / INT \cap INT_{ac} \cap BL) \times P(INT / INT_{ac} \cap BL) \times P(INT_{ac} / BL) \times P(BL)}{P(BL)}$$

Ou seja:

$$P(BL) = 4 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{PH} \cdot \frac{1}{1} \cdot 100 \cdot$$

Logo,

$$P(BL) = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{PH} \quad (5)$$

Dessa forma, a partir das relações (4) e (5) pode-se escrever:

$$NPB_{livre} = \frac{1}{P(BL)} = \frac{PH}{4 \cdot 10^{-6}}, \text{ ou seja,}$$

$$NPB_{livre} = \frac{10^6 \cdot PH}{4} \leq 2000 \quad (6)$$

Portanto, pode-se afirmar que, o espaçamento analisado será aceitável caso a relação (6) seja satisfeita, em função dos níveis de perigo determinados na simulação. Esta aceitabilidade tem como suporte o conceito da análise de segurança TLS (*Target Level of Safety*), ou seja, em termos da taxa de acidente correntemente aceita de 1 acidente a cada 25 milhões de aproximações.

Utilizando-se da relação (6), é calculado o parâmetro “Número permitido de Intrusões Não Recuperáveis (*blunders*) que podem ocorrer livremente” (NPB_{livre}) em função do espaçamento entre as pistas UCSPA, a partir dos dados da Tabela 6.2. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.3.

Tab. 6.3 – Número de Intrusões não Recuperáveis Livres versus L

L (pés) (espaçamento)	PH (%) (probabilidade de perigo)	NPB _{livre}
700	47,268	118.170
800	33,519	83.798
900	21,185	52.963
1.000	11,421	28.553
1.100	5,2058	13.015
1.200	1,7888	4.472
1.300	0,4160	1.040
1.400	0,0442	111
1.500	0,0008	2

Nessas condições, a partir dos resultados da Tabela 6.3 e do valor de referência NPB_{livre} máximo permitido igual a 2000, pode-se concluir que, as pistas de aterrissagem paralelas espaçadas a partir de 1.300 pés (396,2 m), inclusive, são aceitáveis nas operações de aproximação no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*).

Deve ser ressaltado que, este resultado advém da consideração dos diversos parâmetros adotados no modelo de avaliação de perigo proposto (capítulo 5, item 5.2.3). Os parâmetros em questão têm como objetivo, refletir o cenário da aviação em direção aos futuros sistemas de navegação aérea.

6.3. Análise dos Principais Parâmetros

A seguir é apresentada a análise de alguns parâmetros adotados no modelo proposto que influenciam na determinação do nível de perigo nas operações UCSPA.

6.3.1 Influência do Parâmetro Perda de Separação Lateral

O parâmetro perda de separação lateral (MD - *miss distance*) adotado no modelo para a caracterização do estado perigoso, isto é, indicativo da situação de conflito entre duas aeronaves, representa uma variável importante no cálculo do nível de perigo ou da frequência de aeronaves em curso de intrusão nas operações de aproximação em

pistas de aterrissagem paralelas. Este parâmetro induz variações significativas no cômputo da probabilidade de conflito. A referência adotada na literatura técnica corresponde à perda de separação lateral igual a 500 pés (152,4m).

A verificação da influência deste parâmetro no cálculo da probabilidade de perigo de colisão (PH) entre duas aeronaves em operação de aproximação no cenário UCSPA, a partir do modelo proposto, pode ser vista na Tabela 6.4 para diferentes valores de espaçamento entre as pistas paralelas e no parâmetro MD (perda de separação lateral), considerando-se constante os demais parâmetros. Neste caso, são executadas 100.000 simulações em cada configuração.

Tab. 6.4 – Influência do Parâmetro Perda de Separação Lateral

L (pés) (espaçamento)	MD1 (pés) (<i>miss distance</i>) (referência)	PH1 (%) (probabilidade de perigo)	MD2 (pés) (<i>miss distance</i>)	PH2 (%) (probabilidade de perigo)	MD3 (pés) (<i>miss distance</i>)	PH3 (%) (probabilidade de perigo)
700	500	47,268	250	6,850	700	85,911
900	(valor utilizado no modelo)	21,185		0,796		60,677
1.100		5,2058		0,004		31,210

Portanto, como pode ser observado nos resultados da Tabela 6.4, a variação no valor da probabilidade de conflito (PH) é *extremamente significativa*. Uma redução de 50% no valor do parâmetro perda de separação lateral, isto é, de 500 para 250 pés, induz um decréscimo da ordem de 86% no valor da probabilidade de conflito para L = 700 pés e de 99,92% para L = 1.100 pés.

Esta variação decorre do seguinte fato: quanto menor o valor do parâmetro MD (perda de separação lateral), menor o nível de perigo considerado e, portanto, menor a quantidade de situações de conflitos computados pelo modelo. Deve ser ressaltado que, independente do valor de MD, a quantidade de estados de conflito diminui à medida que o espaçamento entre as pistas paralelas aumenta, isto é, para um espaçamento entre as pistas suficientemente grande, a quantidade de eventos *quase-acidente* para duas aeronaves, em operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas, tende a ser zero.

6.3.2. Influência de Outros Parâmetros

Todos os outros parâmetros considerados no modelo influenciam, em maior ou menor grau, no cômputo do nível de perigo nas operações de aproximação no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*), em função do espaçamento entre as pistas paralelas. Estes parâmetros são: separação lateral, separação longitudinal, proa, velocidade e perda de separação lateral (MD), sendo este último, já analisado no item anterior.

Outro parâmetro de particular interesse refere-se às incertezas na determinação da posição da aeronave. Este parâmetro está intimamente relacionado a erros, denominados genericamente de TSE (*Total System Error*), sendo formado por duas componentes: FTE (*Flight Technical Error*) e NSE (*Navigation Sensor Error*).

O erro total do sistema, TSE (*Total System Error*), pode ser significativamente diminuído através do uso de equipamentos adequados e baseados em sinais oriundos de satélites, como por exemplo, GPS (*Global Positioning System*) na forma de sistemas de augmentação WAAS (*Wide Area Augmentation System*) ou LAAS (*Local Area Augmentation System*). Na Tabela 6.5 são apresentados alguns dados com referência a esses erros (Houck; Powell, 2000) e (Houck; Powell, 2001).

Tab. 6.5 – Exemplos de Incertezas FTE e NSE

ambiente	NSE (pés)	FTE (pés)
WAAS	9,84	40 (pilotoado) (*)
LAAS	3,28	25 (piloto automático) (*)
FAA	-	759 (piloto automático) (*)
ICAO ILS Categoria I	385 (**)	-
ICAO ILS Categoria II	342 (**)	-
ICAO ILS Categoria III	290 (**)	-

(*): abaixo do valor especificado, durante 95% do tempo.

(**): erro máximo de navegação permitida.

Portanto, torna-se imperativo a manutenção de um baixo valor de TSE (*Total System Error*) ou das parcelas NSE (*Navigation Sensor Error*) e FTE (*Flight Technical Error*) nas operações de aproximação de aeronaves no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*).

A verificação da influência desse parâmetro no cálculo da probabilidade de perigo de colisão (PH) no cenário UCSPA, pode ser vista na Tabela 6.6 para valores distintos no espaçamento entre as pistas paralelas e erros gerados por TSE ou, sua composição NSE, considerando-se constante os demais parâmetros do modelo.

Com relação ao parâmetro MD (perda de separação lateral), foi considerado o valor de referência (500 pés). Para a obtenção dos resultados numéricos, foram executadas 100.000 simulações em cada configuração.

Pode ser observado que, o desvio padrão ($\sigma = 35$ pés) da segunda coluna da Tabela 6.6 é o valor adotado no modelo proposto. Este erro é devido à precisão do sistema DGPS (*Differential Global Positioning System*), segundo Carpenter; Kuchar (1997).

Tab. 6.6 – Influência do Parâmetro TSE/NSE

L (pés) (espaçamento)	σ_1 (pés) (distr. normal) (referência)	PH1 (%) (probabilidade de perigo)	σ_2 (pés) (distr. normal)	PH2 (%) (probabilidade de perigo)	σ_3 (pés) (distr. normal) (ICAO)	PH3 (%) (probabilidade de perigo)
700	35	47,268	100 (*) (TSE)	49,101	290	55,731
900	(valor utilizado no modelo)	21,185		22,912	(componente NSE – ILS categoria III)	36,295
1.100		5,2058		7,161		19,748

(*): valor utilizado em Houck; Powell (2000).

De acordo com os resultados obtidos e apresentados na Tabela 6.6, pode-se observar que a variação no valor da probabilidade de conflito (PH) é *significativa*. Uma redução de 87,93% no valor do parâmetro NSE, isto é, de 290 para 35 pés, induz um decréscimo da ordem de 15% no valor da probabilidade de conflito para $L = 700$ pés e de 74% para $L = 1.100$ pés.

Portanto, quanto menor o valor do erro na localização da aeronave (representado por TSE ou composição de FTE e NSE), menor a possibilidade de ocorrência de variações significativas em relação à sua posição real (maior precisão na determinação de sua posição) e, conseqüentemente, menor a probabilidade do nível de perigo associado.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais, além de algumas aplicações inseridas no escopo deste trabalho. Em seguida, algumas linhas de pesquisas futuras são sugeridas.

7.1. Conclusões

O objetivo proposto neste trabalho está inserido no âmbito dos futuros sistemas de navegação aérea, especificamente nas operações de aproximação de aeronaves no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*).

O aumento na capacidade de aeroportos dotados de pistas de aterrissagem paralelas em direção a uma taxa ótima de aproximações independentes, em condições meteorológicas adversas, representa uma das premissas dos futuros sistemas de navegação aérea CNS/ATM (*Communications, Navigations, Surveillance/Air Traffic Management*). O conceito CNS/ATM introduzido pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*) tem como preceito básico, o aumento crescente do tráfego aéreo previsto para as próximas décadas. A tecnologia fundamental de suporte à navegação aérea neste cenário será baseada em sistemas de satélites de posicionamento global (GNSS – *Global Navigation Satellite Systems*).

O aumento na taxa de aproximações simultâneas em aeroportos dotados de pistas de aterrissagem paralelas, no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*), terá reflexo direto quanto aos seguintes aspectos:

- Otimização do espaço terrestre a ser utilizado com relação à construção de novos aeroportos e adição de novas pistas;
- Econômico, devido aos diversos custos associados à construção e,
- Menor dano ao meio ambiente e nas comunidades vizinhas do aeroporto.

Com base nessas considerações, o modelo de avaliação de perigo proposto, como ferramenta de auxílio no processo de tomada de decisão quanto ao aspecto da utilização de espaçamentos menores entre as pistas paralelas, mostrou-se bastante

promissor. De fato, de acordo com os resultados obtidos, espaçamento entre as pistas paralelas maiores do que 1.300 pés (396,2 m), inclusive, são perfeitamente aceitáveis para uso nas operações de aproximação no cenário UCSPA.

Porém, deve ser observado que este resultado, viabilidade de uso de pistas paralelas espaçadas acima de 1.300 pés (inclusive) e sujeitos ao mesmo nível de perigo quando comparado às operações de aproximação com sistemas PRM (*Precision Runway Monitor*), tem como pressuposto básico, a utilização de novos equipamentos a bordo das aeronaves como também em terra.

Estas novas tecnologias implicam no desenvolvimento de novas técnicas para refinar os sinais oriundos de satélites, objetivando a determinação precisa da posição da aeronave. Como exemplo, pode-se citar a técnica DGPS (*Differential Global Positioning System*) para a utilização em terra nos sistemas WAAS (*Wide Area Augmentation System*) ou LAAS (*Local Area Augmentation System*); embarcado nas aeronaves, pode-se citar o AILS (*Airborne Information for Lateral Spacing*) e ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance System – Broadcast*).

7.2. Considerações Finais

O pressuposto básico de um bom modelo de simulação é a representação adequada do fenômeno analisado, a partir dos resultados obtidos. Além disso, tais resultados devem servir de referência para estudos ou análises posteriores. Neste contexto, é sempre interessante, quando possível, a comparação com outros modelos projetados com o mesmo objetivo.

Em Houck; Powell (2001) é avaliado a probabilidade de conflito de colisão entre aeronaves durante a operação de aproximação no cenário UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*), considerando-se espaçamentos de 750, 1.100 e 1.500 pés. Neste modelo, o cenário da operação UCSPA adotado corresponde aos aeroportos dotados de infra-estrutura LAAS (*Local Area Augmentation System*).

A Tabela 7.1 ilustra os resultados obtidos pelos autores para 100.000 simulações. Este modelo é referenciado como Modelo de Comparação.

Tab. 7.1 – Probabilidade de Conflito x Espaçamento (Modelo de Comparação)

cenário	Pilotoado com Guia “ <i>tunnel-in-the sky</i> ” (*) FTE $\sigma = 16$ pés	Piloto Automático Inteligente FTE $\sigma = 11,9$ pés	LAAS NSE $\sigma = 4,9$ pés	ILS NSE $\sigma = 132$ pés	Probabilidade de Colisão (%) - PC		
					750 pés	1100 pés	1500 pés
A	x		x		5,857	0	0
B		x	x		0,001	0	0
C		x		x	8,994	0,17	0

(*): protótipo de tela de orientação ao voo, desenvolvido pela Stanford University, cujas informações da rota são apresentadas em três dimensões (Houck et al, 1999).

Os parâmetros FTE (*Flight Technical Error*) no cenário LAAS (*Local Area Augmentation System*) e NSE (*Navigation Sensor Error*) nos cenários ILS (*Instrument Landing System*) e LAAS, indicam as incertezas na localização da aeronave sob a forma de distribuições de probabilidades normais. O parâmetro *perda de separação lateral* (*miss distance* – MD) adotado é de 232 pés, correspondente ao comprimento da fuselagem de um Boeing 747 (Houck; Powell, 2001).

Para efeito de comparação, os parâmetros descritos anteriormente foram implementados no modelo de avaliação de perigo proposto nesta pesquisa, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.2, considerando-se 100.000 simulações.

Tab. 7.2 – Probabilidade de Conflito x Espaçamento (Modelo Proposto)

cenário	Pilotoado com Guia “ <i>tunnel-in-the sky</i> ” (*) FTE $\sigma = 16$ pés	Piloto Automático Inteligente FTE $\sigma = 11,9$ pés	LAAS NSE $\sigma = 4,9$ pés	ILS NSE $\sigma = 132$ pés	Probabilidade de Colisão (%) - PH		
					750 pés	1100 pés	1500 pés
A	x		x		1,678	0	0
B		x	x		1,692	0	0
C		x		x	3,999	0,119	0

Comparando-se os dados obtidos nos dois modelos, pode-se observar que os resultados apresentam discrepâncias apenas no espaçamento de 750 pés nos cenários A, B e C. Contudo, a análise desses resultados sob a ótica da viabilidade de uso desses espaçamentos, utilizando-se da relação (6) apresentada no capítulo 6, isto é,

$$NPB_{livre} = \frac{10^6 \cdot PH}{4} \leq 2000, \text{ conduz aos mesmos resultados, exceto para o cenário B}$$

com espaçamento de 750 pés como ilustra a Tabela 7.3.

Na relação (6), NPB_{livre} indica o número de intrusões não recuperáveis (*blunders*) que podem ocorrer livremente durante as operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas e PH, a probabilidade da perda de separação entre as aeronaves (indicativo da situação de conflito), dado que uma aeronave intrusa tenha ocorrido. O valor de referência, 2.000, é o valor adotado pela FAA (*Federal Aviation Administration*), e representa o número máximo permitido de intrusões não recuperáveis (*blunders*) que podem ocorrer livremente nas operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas.

Tab. 7.3 – Viabilidade de Uso das Pistas: Modelo Proposto x Modelo de Comparação

cenário	750 pés		1.100 pés		1.500 pés	
	modelo de comparação	modelo proposto	modelo de comparação	modelo proposto	modelo de comparação	modelo proposto
A	14.642	4.195	0	0	0	0
B	2,5	4.230	0	0	0	0
C	22.485	9.998	425	298	0	0

Pela análise dos dados da Tabela 7.3 e considerando-se o valor máximo permitido de intrusões não recuperáveis (*blunders*), isto é, $NPB_{livre} = 2.000$, o único resultado divergente entre os dois modelos refere-se ao espaçamento de 750 pés no cenário B.

Com base nos resultados obtidos pela comparação entre as duas abordagens, pode-se afirmar que o modelo de avaliação proposto neste trabalho apresenta resultados coerentes. Em outras palavras, pode-se concluir que o modelo proposto é adequado, como ferramenta de auxílio, nas situações onde seja necessária a análise da minimização do espaçamento entre as pistas de aterrissagem paralelas que estejam no âmbito das operações UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*).

7.3. Aplicações Práticas Relacionadas à Dissertação

De acordo com linha de pesquisa adotada neste trabalho, as principais aplicações de cunho prático no momento detectadas, estão relacionadas às seguintes análises:

- Aumento na taxa de operações independentes, sob condições meteorológicas adversas, em pistas paralelas existentes e espaçadas acima de 1.300 pés (386,24) inclusive. Neste caso, pressupõem-se aeroportos equipados com dispositivos de vigilância mais sofisticados, tais como WAAS (*Wide Area Augmentation System*) ou LAAS (*Local Area Augmentation System*) e, aeronaves com dispositivos de navegação avançados como ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*) e AILS (*Airborne Information for Lateral Spacing*). Esta aplicação está relacionada à otimização do uso do espaço aéreo nas vizinhanças dos aeroportos dotadas de pistas de aterrissagem paralelas.
- Implantação de uma segunda pista e paralela a primeira, em termos de uma menor separação entre as linhas centrais dessas pistas. Esta aplicação permite a diminuição dos custos incorridos na ampliação da nova pista, como também nos possíveis efeitos causados ao meio ambiente e nas vizinhanças do aeroporto.
- Construção de um novo aeroporto com pistas paralelas. Supondo que as condições topográficas e legais estejam de acordo com as necessidades do novo aeroporto, a análise do dimensionamento de uma separação menor entre as pistas paralelas (por exemplo, 1.300 pés) pode ser avaliada, desde que equipamentos mais avançados de vigilância sejam alocados no aeroporto e nas aeronaves.

7.4. Futuras Linhas de Pesquisa

Nos tópicos a seguir, são sugeridas algumas linhas de pesquisas futuras e relacionadas ao tema desenvolvido neste trabalho.

7.4.1. Estudo da Influência das Turbulências nas Operações de Aproximação em Pistas de Aterrissagem Paralelas

A influência das turbulências neste trabalho foi assumida através de incertezas associadas ao parâmetro proa (*heading*), sob a forma de uma distribuição normal com $\mu = 0$ e $\sigma = 2,5^\circ$, segundo Chamberlain; Koczo (1995) apud Carpenter; Kuchar (1997). Propõe-se como linha de pesquisa, uma análise mais detalhada da ação das turbulências neste parâmetro no cenário UCSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*). Vale lembrar que, nos atuais aeroportos que permitem as operações CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*) com espaçamento entre as pistas acima de 2.500 pés, é imposta uma limitação de 2.000 pés no parâmetro *Zona de Não Transgressão* (NTZ), devido aos vórtices gerados pelas aeronaves.

7.4.2. Estudo da Minimização do Parâmetro NOZ (Zona de Operação Normal)

Segundo Haines; Swedish (1981), é possível estabelecer valores diversos para a variável NOZ (*Normal Operating Zone*). Contudo, para valores pequenos de NOZ, a aeronave em operação de aproximação pode ser identificada como intrusa, provavelmente devido aos erros nos sensores de navegação ou pelo próprio instrumento de detecção de conflito. Este fato tem como consequência altos valores de alarmes falsos e a perda de confiança do piloto em todo o processo de aproximação. Portanto, o valor de NOZ (*Normal Operating Zone*) deve ser grande o suficiente para evitar esses inconvenientes, através da utilização de sistemas CD&R (*Conflict Detection and Resolution*) mais sofisticados e mais treinamento à tripulação. A linha de pesquisa proposta neste contexto é o estudo e a proposição de novos algoritmos que atendam um ambiente de NOZ reduzido.

7.4.3. Estudo do Modelo de Crescimento de Células Aplicado ao Controle de Tráfego Aéreo

A idéia central dessa linha de pesquisa é o estudo de como as células vivas se comunicam e se desenvolvem. A partir do entendimento desse comportamento, verificar a possibilidade do desenvolvimento de modelos aplicáveis ao controle de tráfego aéreo. Esta abordagem pode permitir a análise de um grande número de aeronaves em operação de decolagens e aterrissagens simultâneas.

O pressuposto básico deste estudo é uma possível semelhança, em termos de complexidade, entre os sistemas de Controle de Tráfego Aéreo (ATC) e as células. Estas semelhanças incluem:

- Complexidade da rede que compõe a célula e a rede de comunicação oral do serviço de tráfego aéreo (rede de telecomunicações aeronáutica);
- Os organismos individuais que compõe a célula e a comunidade aeronáutica (pilotos e controladores de tráfego aéreo);
- As interações dentro da célula e as interações ocorridas entre pilotos, controladores de tráfego aéreo e equipamentos em geral.

ANEXO – GLOSSÁRIO

A seguir são apresentadas as definições dos principais termos utilizados neste trabalho e relacionados ao setor da aviação.

ACC (*Area Control Center*): Centro de Controle de Área. Corresponde a uma facilidade do controle de tráfego aéreo, ATC (*Air Traffic Control*), para aeronaves sob regras IFR (*Instrument Flight Rules*) durante a fase de vôo em rota (*en-route*). O equivalente americano é denominado de ARTCC (*Air Route Traffic Control Center*).

ADF (*Automatic Direction Finder*): Componente da aeronave utilizado pelos pilotos para navegação utilizando-se do radiofarol NDB (*Nondirectional radio Beacon*).

ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance - Broadcast*): sistema de segurança e comunicação embarcado nas aeronaves, cuja função é a transmissão de informações periodicamente para todas as aeronaves na vizinhança e centros de controle de uma área específica. Permite aos pilotos a facilidade de vigilância ar-ar em espaços domésticos e oceânicos. Utilizam-se de sinais de satélites para navegação e enlace de dados digitais para a transmissão periódica das informações.

Aeródromo: locais no solo ou água onde existam partidas, chegadas e movimentação de aeronaves. São classificados em militares e civis, este último subdividido em aeródromos públicos e privados.

Aeroporto: aeródromos que possuem instalações e facilidades no apoio às operações das aeronaves. São classificados em domésticos e internacionais.

Aerovia: controle de área designado formalmente e definido em termos da cobertura do sistema de apoio de navegação rádio.

AILS (*Airborne Information for Lateral Spacing*): equipamento de navegação embarcada no *cockpit* das aeronaves. É uma tecnologia desenvolvida conjuntamente entre a NASA e indústrias. Permite aproximações seguras mais próximas entre as aeronaves do que o permitido atualmente por instrumentos convencionais. O display de um sistema AILS mostra ao piloto o tráfego da vizinhança. Tem como suporte tecnológico o uso de sinais de satélite tipo DGPS (*Differential Global Positioning Satellite*). Aeronaves embarcadas com sistema AILS podem, teoricamente, executar aproximações em pistas paralelas com espaçamentos acima de 2.500 pés (762 m).

ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*): modelo de aceitabilidade de risco definido pela IEC (*International Electrotechnical Commission*).

APP (Centro de Controle de Aproximação): serviço de controle de aproximação e decolagem de aeronaves sob regras VFR/IFR (*Visual Flight Rules/Instrument Flight Rules*) e, ocasionalmente, para tráfegos em rota (*en route*).

ARTCC (*Air Route Traffic Control Center*): facilidade do controle de tráfego aéreo cuja função primária é prover a separação entre aeronaves em rota (*en-route*) entre aeroportos. É equivalente à denominação ACC (Centro de Controle de Área).

ASR (*Airport Surveillance Radar*): radar de controle de aproximação utilizado para separar aeronaves nas vizinhanças de um aeroporto. Radares ASRs normalmente possuem uma faixa máxima de cobertura de 60 milhas náuticas com tempo de varredura de radar da ordem de 4,8 segundos.

ATC (*Air Traffic Control*): Controle de Tráfego Aéreo. Genericamente, indica o serviço disponibilizado por uma autoridade cujo objetivo é a promoção da segurança, ordenamento e expedição do fluxo de tráfego aéreo.

ATCT (*Air Traffic Control Tower*): facilidade do controle de tráfego aéreo cuja função básica é prover a separação adequada na pista para aeronaves que saem e chegam nos aeroportos primários.

ATIS (*Automatic Terminal Information Service*): radiodifusão contínua de informações (não-controle) previamente gravadas em áreas terminais selecionadas. Tem como objetivo melhorar a efetividade do controlador e aliviar o congestionamento de frequências pela transmissão automática e repetitiva de informações essenciais de rotina.

ATM (*Air Traffic Management*): processo de gestão, organização, utilização e controle de recursos, cujo objetivo é viabilizar o melhor desempenho do tráfego aéreo de um espaço controlado. Tem como objetivo permitir as operadoras cumprirem os planos de vôos planejados com um mínimo de constrangimento sem comprometer os níveis de segurança acordados.

Bank Angle: ângulo entre o eixo normal da aeronave e o plano vertical da terra que contém o eixo longitudinal da aeronave. Este ângulo indica o movimento de rotação que a aeronave executa no seu eixo longitudinal. Também chamado de *roll angle*.

Blunder: ocorrência não esperada pelo controlador de tráfego aéreo e que pode resultar em situações potenciais de conflito (colisão entre aeronaves em operação de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas). Definido como uma mudança repentina de 30° pela aeronave intrusa em direção à trajetória da outra aeronave.

Capacidade do Aeroporto: número máximo de operações de aeronaves que podem, de forma segura, serem realizadas no aeroporto.

CD&R (*Conflict Detection and Resolution*): algoritmo de detecção e resolução de conflitos de colisão embarcados em instrumentos específicos na aeronave. Este instrumento é conhecido como TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*) no padrão americano e ACAS (*Airbone Collision Avoidance System*) pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*).

Controlador de Tráfego Aéreo: pessoa na torre de controle de tráfego aéreo ou facilidade de controle radar de aproximação que coordena, de forma segura e ordenada, a expedição do fluxo do tráfego aéreo dentro de um espaço aéreo designado.

CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management*): movimento da aviação em direção a um novo sistema de comunicação, navegação, vigilância/gerenciamento do tráfego aéreo. Um sistema global de comunicação e navegação, baseados em satélites, permitirá a gerência de tráfegos aéreos densos com melhoras significativas na segurança e ao mesmo tempo, permitindo às aeronaves voar em altitudes ótimas e em rotas o mais direto possível.

Cockpit: compartimento em frente da aeronave onde os membros da tripulação executam suas tarefas de condução do voo da aeronave.

CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*): corresponde às operações de aproximação de aeronaves em pistas de aterrissagem paralelas, cujo espaçamento entre as pistas é variável. Dependendo do espaçamento entre as pistas, dos equipamentos disponíveis (aeroporto e aeronaves) e das condições meteorológicas, diversos tipos de procedimentos de aproximação estão disponíveis.

Data Link (Enlace de Dados): sistema de comunicação digital que permite a transmissão de dados a partir do controlador de tráfego aéreo à aeronave e vice versa. Esta transmissão pode conter autorizações, informações meteorológicas, instruções de controle ou solicitações do piloto-controlador.

DCIA (*Dependent Converging Instrument Approaches*): operação de aproximação dependente de aeronaves em pistas convergentes. Veja diferença do cenário CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*), onde as pistas de aterrissagens são paralelas.

DGPS (*Differential GPS*): técnica utilizada para aumentar a precisão no posicionamento de aeronaves através do uso de sinais de satélite GPS (*Global Positioning System*). Esta técnica se baseia na utilização de um receptor GPS com localização conhecida (referência estática) e com isso, determinar exatamente que erros os dados do satélite contém. Estes erros são transmitidos, na forma de mensagens, a outros receptores GPS localizados na mesma área para correção de suas posições. Nas aplicações aeronáuticas, é utilizada uma estação em terra para a correção dos códigos recebidos dos satélites.

DME (*Distance Measuring Equipment*): equipamento eletrônico que consiste de um sistema interrogador e um transponder, permitindo ao piloto determinar com precisão, a distância da aeronave a partir da estação terrena. O transponder DME baseado em terra é normalmente co-aloado com um VOR (*VHF Omni directional Range*) ou um ILS (*Instrument Landing System*). Uma versão de DME é um componente funcional do sistema de aterrissagem por microondas.

En-route: fase do plano de voo durante a qual a aeronave está navegando na mais alta altitude. Esta fase do voo pode durar desde alguns minutos até várias horas. Outros sinônimos incluem rota de cruzeiro ou simplesmente em rota.

Espaço Oceânico: espaço aéreo sobre o oceano, considerado espaço aéreo internacional, onde a separação oceânica e os procedimentos são aplicados de acordo com as regras da ICAO (*International Civil Aviation Organization*). A responsabilidade pela provisão do serviço de controle de tráfego aéreo neste espaço é delegada a vários países, baseados geralmente pela proximidade geográfica e da disponibilidade dos recursos necessários.

EUROCONTROL (*European Organization for the safety of Air Navigation*): agência responsável pela coordenação e gerenciamento do tráfego aéreo na Europa (41 países). Desenvolve soluções em parceria com as indústrias e operadoras.

FAA (*Federal Aviation Administration*): agência do departamento de transporte dos EUA, responsável pela operação do sistema de controle de tráfego aéreo civil, segurança nos aeroportos, licenças de pilotos e inspeção de aeronaves.

FIR (*Flight Information Regions*): espaço aéreo dentro do qual o serviço de controle de tráfego aéreo é provido.

FL (*Flight Level*): um nível constante da pressão atmosférica relacionada à referência de 29,92 polegadas de mercúrio. Todo *Flight Level* é definido em termos de centenas de pés com os dois últimos zeros desconsiderados.

FMS (*Flight Management System*): sistema de computador que utiliza uma grande base de dados, permitindo que rotas sejam pré-programadas e alimentadas através do carregamento de dados. O sistema é constantemente atualizado tendo como referência, o sistema de ajuda a navegação convencional.

FTE (*Flight Technical Error*): Erros Técnicos de Voo. Corresponde a medida de como o piloto ou piloto automático mantém a trajetória nominal prevista em termos do controle da aeronave.

GNSS (*Global Navigation Satellite System*): similar ao sistema GPS (*Global Positioning System*). Este termo é utilizado no âmbito da ICAO no cenário dos futuros sistemas CNS/ATM.

GPS (*Global Positioning System*): sistema de posicionamento e navegação rádio alocado no espaço através do uso de satélites. O sistema provê informações precisas de posição, velocidade e tempo em uma base global para um número ilimitado de usuários devidamente equipados. O conceito do GPS, em termos de predição, é baseado no conhecimento da posição espacial de cada satélite no sistema com respeito ao tempo e a distância a partir de um satélite transmissor ao usuário. O receptor GPS automaticamente seleciona um sinal apropriado do satélite à vista e transforma estas informações em posição tridimensional, velocidade e tempo. A precisão habilitada para usuários civis é normalmente de 100 metros horizontalmente.

Ground Control (Controle de Terra): operação de posicionamento em uma torre de controle responsável pelo movimento de aeronaves e veículos na superfície do aeroporto, incluindo os procedimentos de táxi.

Handoff: ação para transferir a identificação do radar de uma aeronave, a partir de um controlador de tráfego aéreo a outro, quando a aeronave entrar no espaço aéreo do próximo controlador; as comunicações via rádio também são transferidas.

Heading (proa): direção apontada pelo eixo longitudinal de uma aeronave, usualmente expresso em graus a partir do Norte (verdadeiro ou magnético).

ICAO (*International Civil Aviation Organization*): a Organização Internacional da Aviação Civil é uma agência especializada das Nações Unidas, cujo objetivo é desenvolver os princípios da navegação aérea internacional e as técnicas de controle do tráfego aéreo. Entre suas competências inclui o estabelecimento de normas para a aviação civil. Foi instituído em outubro de 1947 e tem como sede à cidade de Montreal no Canadá.

IFR (*Instrument Flight Rules*): regras que governam a conduta da aeronave durante vôos por instrumentos.

ILS (*Instrument Landing System*): equipamento de navegação que emprega duas antenas separadas para prover ao piloto a guia horizontal e vertical da pista na operação de aproximação com precisão. Consiste de um localizador, equipamento indicador de inclinação, radiofaróis marcadores e um sistema de luzes de aproximação. São divididos em nas seguintes categorias como indica a Tabela A.1.

Tab. A.1 – Categorias de Aproximação por ILS

Categoria ILS	Teto	Visibilidade ou Faixa Visual da Pista
I	200 pés	1/2 milha ou 2.400 pés
II	100 pés	1.200 pés
IIIa	•	700 pés
IIIb	•	150 pés
IIIc	•	*

•: sem especificação da altura de decisão ou teto. A visibilidade é o único fator limitante

*: sem teto ou visibilidade especificada. A aeronave deve estar equipada com equipamentos de aterrissagem automática.

IMC (*Instrument Meteorological Conditions*): condições meteorológicas expressas em termos da visibilidade, distância a partir de nuvens e teto menor do que o valor mínimo especificado para navegação em boas condições meteorológicas, VMC (*Visual Meteorological Conditions*).

In-crossing: evento de cruzamento indicativo da entrada da posição relativa s_t de uma aeronave em uma dada área. A área D é definida da forma: $s_{t-\Delta} \in D^c$ e $s_t \in D$ para $\Delta \rightarrow 0$, onde D^c indica o complemento de D .

LAAS (*Local Area Augmentation System*): sistema de correção do sinal de satélite GPS nas operações de aproximação com precisão categorias I, II e III. O sistema LAAS proverá a correção de dados para a aeronave e receptores da superfície que resultarão na precisão de navegação a menos de 40 polegadas (101,6cm) a distâncias de 20 milhas náuticas (37.060m) ou mais a partir do aeroporto.

Localizer (localizador): componente do sistema ILS (*Instrument Landing System*) que provê a guia lateral para a aeronave em operação de aproximação por precisão.

Milha Náutica (*Nautical Mile*): unidade de medida igual 1.853 metros ou 6.080 pés.

Miss Distance: corresponde a um valor de referência mínimo admitido para a definição do evento de conflito (perigo de colisão entre aeronaves). Em geral é adotado o valor de 500 pés. Outros valores podem ser utilizados, como por exemplo, o comprimento da envergadura de uma aeronave.

NDB (*Nondirection radio Beacon*): radiofarol de navegação que transmite um sinal uniforme onidirecional na banda de frequência LF ou MF (190 - 540 kHz). O receptor, manual, na aeronave é denominado de DF - *Direction Finder*, enquanto que o receptor automático é denominado de ADF - *Automatic Direction Finder*.

Nó (*knot*): unidade de velocidade igual a 1.853 metros/hora ou 6.080 pés/hora.

NOZ (*Normal Operating Zone*): a Zona de Operação Normal corresponde à região dentro da qual a aeronave deve permanecer durante a operação de aproximação simultânea e independente em pistas paralelas (aproximação por instrumentos, ILS – *Instrument Landing System*).

NPB_{livre}: número de intrusões não recuperáveis (*blunders*) que podem ocorrer livremente durante as operações de aproximação em pistas de aterrissagem paralelas.

NSE (*Navigation Sensor Error*): Erros nos Sensores de Navegação. Determina a precisão do sistema de navegação e corresponde à diferença entre a posição real da aeronave e a medida.

NTZ (*No Transgression Zone*): a Zona de Não Transgressão corresponde à região onde é proibida a navegação de aeronaves. Tem uma largura de 2.000 pés e está localizado de forma equidistante entre a linha estendida das pistas paralelas.

Pé (*foot*): unidade de medida igual 0,3048 metros.

PRM (*Precision Runway Monitor*): sistema em terra que combina uma alta taxa de atualização radar com displays adequados, permitindo o controlador de tráfego aéreo

monitorar aeronaves em aproximações independentes sob regras IFR (*Instrument Flight Rules*) em pistas paralelas e triplas espaçadas a menos de 4.300 pés. Em geral, é utilizado em aeroportos cujo espaçamento entre as pistas paralelas seja de pelo menos 3.400 pés.

Proa: mesmo que *heading*.

RA (*Resolution Advisories*): sinalização emitida pelo ACAS (*Airborne Collision Avoidance System*) indicativo de recomendação de manobra corretiva pelo piloto.

Radar: equipamento de detecção rádio. O sistema radar mede o intervalo entre a transmissão e a recepção de um pulso rádio para determinar a posição de uma aeronave ou objeto.

SCIA (*Simultaneous Converging Instrument Approaches*): operação de aproximação independente e simultânea de aeronaves em pistas convergentes. Veja diferença do cenário CSPA (*Closely Spaced Parallel Approaches*), onde as pistas de aterrissagens são paralelas.

See and be seen (ou *see and avoid*): quando as condições meteorológicas permitem, pilotos que operam sobre regras IFR (*Instrument Flight Rules*) ou VFR (*Visual Flight Rules*) são obrigados a observar e realizar manobras para evitar conflitos com outras aeronaves.

Separação Lateral: método de separação de aeronaves que operam na mesma altitude, mas em diferentes rotas.

Separação Longitudinal: método de separação de aeronaves que operam na mesma altitude sobre a mesma rota.

Separação Vertical: método de separação de aeronaves que operam em diferentes altitudes sobre a mesma rota.

Sector de Controle: área do espaço aéreo com dimensões definidas horizontalmente e verticalmente para cada controlador de tráfego aéreo ou grupo de controladores de tráfego aéreo. Os controladores de tráfego aéreo têm a responsabilidade do controle de tráfego aéreo dentro de um centro de controle de rotas aéreas ou área terminal. Os setores são estabelecidos com base no fluxo de tráfego predominante, altitude e carga do controlador. As comunicações dos pilotos durante as operações dentro de um setor são mantidas normalmente em frequências discretas designadas ao setor.

Sistema Aeroportuário: sistema constituído pelo conjunto de aeródromos com todas as pistas de pouso, pistas de táxi, pátio de estacionamento de aeronave, terminal de carga aérea, terminal de passageiros e as respectivas facilidades.

TA (*Traffic Advisories*): sinalização emitida pelo ACAS (*Airbone Collision Avoidance System*) indicativo de que o piloto deve realizar busca visual de aeronaves na vizinhança.

TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*): sistema de segurança embarcado nas aeronaves para prevenir a colisão ar-ar entre aeronaves.

TSE (*Total System Error*): corresponde à soma dos erros gerados pelo NSE (*Navigation Sensor Error*) com FTE (*Flight Technical Error*).

TRACON (*Terminal Radar Approach Control*): facilidade de controle de tráfego aéreo associado com uma torre de controle que utiliza radar para prover o serviço de aproximação às aeronaves.

Transponder: componente de um sistema embarcado na aeronave que responde as interrogações de um sistema em terra. Genericamente, indicam canais de comunicação que funcionam como unidade repetidora.

TWR (*Tower*): corresponde ao Centro de Controle de Aeródromo, responsável pelo controle de movimentos de aeronaves no solo e nas vizinhanças do aeroporto. Também conhecido como ATCT (*Airport Traffic Control Towers*).

UCSPA (*Ultra Closely Spaced Parallel Approaches*): corresponde às operações de aproximação de aeronaves em pistas de aterrissagem paralelas, cujo espaçamento entre as pistas está compreendida entre 750 a 1.500 pés.

UHF (*Ultra High Frequency*): banda de frequência entre 300 e 3.000 MHz.

VFR (*Visual Flight Rules*): regras que governam procedimentos de condução de vôos durante boas condições visuais.

VHF (*Very High Frequency*): banda de frequência entre 30 a 300 MHz.

VMC (*Visual Meteorological Conditions*): condições meteorológicas expressas em termos da visibilidade, distância a partir de nuvens e teto igual (ou melhor) do que um valor mínimo especificado.

VOR (*VHF Omni directional Range*): sistema de navegação em terra, cuja função é transmitir cursos de navegação. Cada VOR é designado com uma frequência entre 108,10 e 117,90 MHz. A transmissão do sinal VOR é modulada com dois sinais: um

sinal de referência que é constante em todas as direções e um sinal de fase variável que varia com o azimute (direção). O sinal variável é modulado de tal forma que, na direção do norte magnético os sinais de referência e variável estão na mesma fase.

Vórtices: mesmo que *Wake Vortex*.

WAAS (*Wide Area Augmentation System*): sistema de correção de sinais de satélite DGPS (*Differential Global Positioning Satellite*) para prover a navegação em rota e aproximações de precisão categoria I. É projetado para utilizar estações de referência cobrindo uma ampla área (país) e retransmitir os erros oriundos dos satélites GPS às aeronaves através de satélites de comunicação geoestacionários.

WAKE VORTEX: vórtices ou redemoinhos produzidos pelas pontas das asas de uma aeronave. Dependem do tipo da aeronave, peso, envergadura, etc. É criado no momento da decolagem e cancelado no instante que atinge o solo na aterrissagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Airborne Collision Avoidance System II (ACAS II): Position Paper - CNS/ATM Steering Group. Joint Aviation Authorities, November 1998.

ACAS II Programme: WP.6.1 - ACAS Brochure. Version 1.0, 26-01-1999.

Ayyub, Bilal M.; Bender, William J.: Assessment of the Construction Feasibility of the Mobile Offshore Base, Part I - Risk Informed Assessment Methodology, Technical Report No. CTSM-98-RBA-MOB-1. February 1999.

Bakker, G. J.; Blom, Henk, A. P.: Air Traffic Collision Risk Modeling. IEEE - Proceedings of the 32nd Conference on Decision and Control. San Antonio. Texas, December 1993.

Bakker, G. J.; Kremer, H. J.; Blom, H. A. P.: Geometric and Probabilistic Approaches Towards Conflict Prediction. 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Naples. Italy, June 2000.

Bakker, G. J.; Kremer, H. J.; Blom, H. A. P.: Probabilistic Approaches Towards Conflict Prediction. Report by National Aerospace Laboratory NLR-TP-2001-634. Report based on an article published in Air Transportation Systems Engineering. Editors G. L. Donohue and A. G. Zellweger. Published by the AIAA, Inc., July 2001.

Bedford, Tim; Cooke, Roger: Probabilistic Risk Analysis. Foundations and Methods. Cambridge University Press, 2001.

Bier, V. M.: On the State of the Art - Risk Communication to the Public. Reliability Engineering and System Safety. 139 – 150, 2001 (1).

Bier, V. M.: On the State of the Art - Risk Communication to the Decision-Makers. Reliability Engineering and System Safety. 151 – 157, 2001 (2).

Billinton, Roy; Li, Wenyuan: Reliability Assessment of Electrical Power Systems using Monte Carlo Methods. Plenum Press, 1994.

Blom, H. A. P.; Bakker, G. J.; Blanker, P. J. G.; Daams, J.: Accident Risk Assessment for Advanced ATM. Eurocontrol Seminar. France, 1998.

Blom, A. P.; Klompstra, Margriete B.; Bakker, Bert: Accident Risk Assessment of Simultaneous Converging Instrument Approaches. 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Sta Fe, December 2001.

Boeing Commercial Airplane Group. Nextor Report # RR-97-3. Air Traffic Management Concept Baseline Definition. October 31, 1997.

Bone, Randall S.; Olmos, B. Oscar; Mundra, Anand: Paired Approach - A Closely Spaced Parallel Runway Approach Concept. MITRE Corporation's Center for Advanced Aviation System Development, 2001.

(fonte: http://www.mitre.org/support/papers/tech_papers_01/bone_paired/index.shtml)

Brand, K. P.; Small, M. J.: Updating Uncertainty in an Integrated Risk Assessment - Conceptual Framework and Methods. Risk Analysis. Vol. 15, no. 6, 1995.

Buley, Robert; Corwin, Bill: Closely Spaced Parallel Approaches. June, 1998.

(fonte: http://www.boeing.com/commercial/caft/cwg/ads_b/closely.pdf)

Buslenko, N. P.; Golenko, D. I.; Shreider, Yu. A.; Sobol, I. M. and Sragovich, V. G.: The Monte Carlo Method. Pergomon Press, 1966.

Camargo, João B. Jr.: Estudo da Segurança em Sistemas de Controle Metro-Ferrovários, 142p. - Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

Camargo, João B. Jr.: Metodologia de Análise de Risco em Sistemas Computacionais de Aplicação Crítica, 145p. - Tese de Livre Docência. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

Carpenter, Brenda D.; Kuchar, James K.: Probability-based Collision Alerting Logic For Closely Spaced Parallel Approach. AIAA-97-0222. American Institute of Aeronautics and Astronautics Meeting, January 1997.

Cassel, Rick; Smith, Alex; Shepherd, Roger: A Risk Assessment Model for Free Flight Terminal Area Reduced Separation. Rannoch Corp., acessado em fev/2003.

(<http://www.rannoch.com/PDF/dascrso.pdf>)

Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA, 2002).

(fonte: <http://www.cenipa.aer.mil.br/paginas/estatisticas.htm>)

Chamberlain, S.; Koczo, S.: Close Parallel Runway Operations (CPROPS) Prototype Alerting System Definition and Evaluation. Rockwell-Collins Draft Report Paper. August 14, 1995.

Computational Science Education Project (CSEP): Electronic Book - Introduction to Monte Carlo Methods and Random Number Generators, 1995.

(fonte: <http://csep1.phy.ornl.gov>)

Dowek, Gilles; Munõz, Cesar; Geser, Alfons, et al: Tactical Conflict Detection and Resolution in a 3-D Airspace - ICASE, April 2001.

Federal Aviation Administration (FAA): Precision Runway Monitor Demonstration; DOT/FAA/RD-91/5, February 1991.

Federal Aviation Administration (FAA): The Precision Runway Monitor, April 1997.

(fonte: <http://www.tc.faa.gov/act310/projects/prm/pag1.htm>)

Federal Aviation Administration (FAA): AW1 - Maintain Runway Use in Reduced Visibility. V4.0, December 2001.

(fonte: <http://www2.faa.gov/programs/oep/solution%20sets/aw1/AW-1v4final.pdf>)

Federal Aviation Administration (FAA) & Eurocontrol: An FAA/EUROCONTROL Cooperative Effort on Air Traffic Modeling for Separation Standards - A Concept Paper for Separation Safety Modeling, May 1998.

Fischhoff, Baruch; Lichtenstein, Sarah; Slovic, Paul, et al: Acceptable Risk. Cambridge University Press, 1999.

Galotti, Vincent P. Jr.: The Future Air Navigation System (FANS). Ashgate Publishing Company, 1998.

Gentle, James E.: Random Number Generation and Monte Carlo Methods. Statistics and Computing; Springer. Verlag, 1998.

Greenberger, M.: An a Priori Determination of Serial Correlation in Computer Generated Random Numbers. Math. Comp. No. 15. pp. 383-389, 1961.

Haines, A. L.; Swedish, W. J.: Requirements for Independent and Dependent Parallel Instrument Approaches at Reduced Runway Spacing. The Mitre Corporation. MTR-81W15, May 1981.

Hammersley, J. M.; Handscomb, D. C.: Monte Carlo Methods. Methuen's Monographs on Applied Probability and Statistics. Methuen & Coltd, 1964.

Henley, Ernest J.; Kumamoto, Hiromitsu: Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice-Hall, Inc., 1981.

Houck, Sharon; Barrows, Andrew; Parkinson, Bradford; Enge, Per; Powel, J. David: Flight Testing WAAS for Use in Closely Spaced Parallel Approaches. Proceedings of the Institute of Navigation's GPS Conf. Nashville, 1999.

Houck, Sharon; Powell, David: A Parametric Sensitivity Study of Ultra Closely Spaced Parallel Approaches. Proceedings of the Digital Avionics Systems Conference. Philadelphia. PA. DASC-124, 2000.

Houck, Sharon; Powell, David: Assessment of the Probability of a Midair Collision During an Ultra Closely Spaced Parallel Approach. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA-2001-4205, 2001.

Hu, Jianghai; Prandini, Maria; Sastry, Shankar: Optimal Maneuver for Multiple Aircraft Conflict Resolution - A Braid Point of View, 2000.

(fonte: http://robotics.eecs.berkeley.edub~jianghai/PostScript/CDC2000_REG1743.pdf)

International Civil Aviation Organization (ICAO): Statement of ICAO Policy on CNS/ATM Systems Implementation and Operation - Approved by Council (C 141/13) on 9 March 1994.

International Civil Aviation Organization (ICAO) Doc 4444-RAC 501: Rules of the Air and Air Traffic Services.

International Electrotechnical Commission (IEC): IEC1508-5 – Examples of methods for the determination of safety integrity levels, May 1997.

International Electrotechnical Commission (IEC): Functional Safety and IEC 61508: A Basic Guide, November 2002.

Johnson, William G.: MORT Safety Assurance System. Marcel Dekker. Inc., 1980.

Johnson, Barry W.: Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

Johnson, Branden: Advancing Understanding of Knowledge's Role in Lay Risk Perception. American Sociological Association meeting in Pittsburgh, August 1992.

(fonte: <http://www.fplc.edu/RISK/vol4/summer/johnson.htm>)

Kaplan, Stanley; Garrick, B. John: On the Quantitative Definition of Risk. Risk Analysis. Vol.1. No 1, 1981.

Kapur, K. C.; Lamberson, L. R.: Reliability in Engineering Design. John Wiley & Sons Inc. 1997.

Kemp, R. V.: Risk Tolerance and Safety Management. Reliability Engineering and System Safety. 345 – 353, 1991.

Kleijnen, Jack; Groenendaal, Willem Van: Simulation a Statistical Perspective. John Wiley & Sons LTD, 1992.

Knuth, D. E.: The Art of Computer Programming – Seminumerical Algorithms, Vol.2, Addison Wesley, Massachusetts, 1969.

Kos, J.; Blom, H. A. P.; Speijker, L. J. P.; Klompstra, M. B.; Bakker, G. J.: Probabilistic Wake Vortex Induced Accident Risk Assessment. 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, June 2000.

Krause, Shari Stamford: Aircraft Safety - Accident Investigations, Analyses, & Applications. McGraw-Hill, 1996.

Kuchar, James K.; Yang, Lee C.: A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System. 1(4). 179-189, 2000.

Lankford; McCartor; Yates; Ladecky; Templeton: Comparative Study of Airborne Information Lateral Spacing (AILS) System with Precision Runway Monitor System, DOT-FAA-AFS-420-83, April 2000.

Landry, Steve; Nickles, Lee: Closely Spaced Parallel Approaches - Problem Description and Background, December 1999.

(fonte: <http://www.isye.gatech.edu/~tg/courses/6219/assign/fall99/cspa/problem.htm>)

LaSala, Kenneth P.: Human Performance Reliability - A Historical Perspective, IEEE Transactions on Reliability, vol 47, no.3-SP. September 1998.

Leveson, Nancy G.: Safeware - System Safety and Computers. Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

Leveson, Nancy G.: A New Accident Model for Engineering Safer Systems. MIT Engineering Systems Division Internal Symposium. May 2002.

Lind, Niels: Social and Economic Criteria of Acceptable Risk. Reliability Engineering and System Safety. 21 – 25, 2002.

Lozito S.; McGann A.; Mackontosk M. A.: Free Flight and Self-Separation from Flight Deck Perspective - NASA Ames Research Center, 1999.

Lygeros, J.; Prandini, M.: Aircraft and Weather Models for Probabilistic Collision Avoidance in Air Traffic Control. IEEE Conference on Decision Control, 2002.

Machado, Rogério Ribeiro: Os Caminhos da Informática. Revista Aeroespço. Ano X. nº 14, agosto/2000.

Magyarits, S. M.; Ozmore, R. E.: Evaluation of Triple Independent Instrument Landing System Approaches to Runway Spaced 4,000 ft and 5,300 ft Apart Using a Precision Runway Monitor System. DOT/FAA/CT-TN02/16. May 2002.

McCormick, Norman, J.: Reliability and Risk Analysis. Methods and Nuclear Power Applications. Academic Press Inc, 1981.

Montague, David F.: Process Risk Evaluation - What Method to Use? Reliability Engineering and System Safety. 27 – 53, 1990.

Morrow-Magyarits, Sherri; Ozmore, Richard: Technical Note - Terminal Air Traffic Control Radar and Display System Recommendations for Monitoring Simultaneous Instrument Approaches. DOT/FAA/CT-TN99/24, December 1999.

Muñoz, C.; Carreño, V.: Aircraft Trajectory Modeling and Alerting Algorithm Verification. ICASE Report No. 2000-16. NASA/CR-2000-210097, April 2000.

National Aeronautics and Space Administration (NASA): Toward a Safer 21st Century - Aviation Safety Research Baseline and Future Challenges. NASA/FAA. December, 1996.

(fonte: <http://www.aero-space.gov/library/homeC.htm> em 15/10/2001)

National Aeronautics and Space Administration (NASA): Airborne Information for Lateral Spacing (AILS), September 2000.

(fonte: <http://www.aero-space.nasa.gov/curevent/news/vol1iss2/ails.htm>)

Neumann, Peter G.: Computer Related Risks. Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

Newman, T. G.; Odell, P. L.: The Generation of Random Variates. Charles Griffittin & Company Limited, 1971.

Nolan, Michael S.: Fundamentals of Air Traffic Control. Brooks/Cole Publishing Company. 3rd edition, 1998.

Otway, H. J.; Erdmann, R. C.: Nuclear Eng. Design 13, 365, 1970.

Perry, Tekla S.: In Search of the Future of Air Traffic Control - The Truth about Air Traffic Control. IEEE Spectrum, August 1997.

Powel, Douglas: An Introduction to Risk Communication and the Perception of Risk, 1996.

(fonte: <http://www.oac.uoguelph.ca/riskcomm/rc-basics/risk-review/risk-review.htm>)

Pressman, Roger S.: Software Engineering. A Practitioner's Approach. MacGraw-Hill. 5th edition, 2001.

Profit, Richard: Systematic Safety Management in the Air Traffic Services. Euromoney Publications PLC, 1995.

Reich, P. G.: A Theory of Safe Separation Standards for Air Traffic Control. Technical Report 64041. Royal Aircraft Establishment. U.K., 1964.

Robert, C. P.; Casella, G.: Monte Carlo Statistical Methods. Springer-Verlag, 1999.

Roderick, S. Nicholas: Validation of a Computer-based Hazard Control System for a Robotic Payload on the Space Shuttle. Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland in the fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 2000.

Sales, C. Rogério: Regulamento de Tráfego Aéreo, 2002.

(fonte: <http://www.airandinas.com>)

Scardigli, Victor: Um Mundo Totalmente Digital? Revista Eletrônica Le Monde Diplomatique. Ano 3, nº 33 - Tradução Fábio Castro, Outubro/2002.

(fonte: <http://www.diplo.com.br>)

Sheperd, Roger; Cassel, Rick; Thapa, Rajeev; Lee, Derrick: A Reduced Aircraft Separation Risk Assessment Model. AIAA Inc., 1997.

Shimizu, Tamio: Método de Monte Carlo. Tese apresentada ao Departamento de Matemática e a Comissão de Pós Graduação do Instituto Tecnológico da Aeronáutica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciência. São José dos Campos – SP, Dezembro/1996.

Siewerdt, Eno: Tráfego Aéreo - Os Limites do Crescimento. Revista Aeroespço. Ano X. nº 14. Agosto/2000.

Siewiorek, Daniel P.; Swarz, Robert S.: Theory and Practice of Reliable System Design. Digital Press, 1982.

Sjoberg, Lennart: Stockholm Scholl of Economics - Factors in Risk Perception. Risk Analysis. vol. 20, No. 1, 2000.

Sobol, I: O Método de Monte Carlo. Editora Mir, 1983.

Storey, Neil: Safety-Critical Computer Systems. Addison Wesley Longman, 1996.

Tomlin, Claire; Pappas, George J.; Sastry, Shankar: Conflict Resolution for Air Traffic Management - A Study in Multiagent Hybrid Systems. IEEE Transactions on Automatic Control. vol. 43, nº 43, April 1998.

Yates, Roy D.; Goodman, David J.: Probability and Stochastic Processes. John Wiley & Sons, Inc, 1999.

Waller, Marvin C.; Scanlon, Charles 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 report NASA/TM-1999-208743, march 1999.

Watkins, Oliver; Lygeros, John: Safety Relevant Operational Cases in Air Traffic Management. Project HYBRIDGE. EU IST Programme. WP1 - Identification and Modeling of Uncertain Hybrid Systems. ver. 1.2. task nr. 1.1, November 2002.

Wickens, Christopher D., et al: The Future of Air Traffic Control - Human Operators and Automation. National Academy Press, 1998.

Weigang, L.: Knowledge-Based System for Air Traffic Flow Management - Timetable Rescheduling and Centralized Flow Control. 159p. Tese de Doutor em Ciências. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. São José dos Campos. SP, 1994.

Wells, Alexander T. Commercial Aviation Safety. McGraw-Hill. 3rd edition, 2001.

Woller, Joy: The Basics of Monte Carlo Simulations. University of Nebraska-Lincoln. Physical Chemistry Lab., Spring 1996.

(fonte: <http://wwitch.unl.edu/zeng/joy/mclab/mcintro.html> em 18/10/2001)