

FERNANDO DE OLIVEIRA GIL

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DAS COMUNICAÇÕES ENTRE
CONTROLADOR E PILOTO VIA ENLACE DE DADOS (CPDLC) APLICADA EM
ÁREAS TERMINAIS

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

São Paulo

2011

FERNANDO DE OLIVEIRA GIL

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DAS COMUNICAÇÕES ENTRE
CONTROLADOR E PILOTO VIA ENLACE DE DADOS (CPDLC) APLICADA EM
ÁREAS TERMINAIS

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

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica - Sistemas Digitais

Orientador: Professor Livre-Docente João
Batista Camargo Junior

São Paulo

2011

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

São Paulo, 18 de julho de 2011.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Gil, Fernando de Oliveira

Metodologia de avaliação de segurança das comunicações entre controlador e piloto via enlace de dados (CPDLC) aplicada em áreas terminais / F.O. Gil. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.

150 p.

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

1. Tráfego aéreo 2. Comunicação digital 3. Simulação de sistemas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II. t.

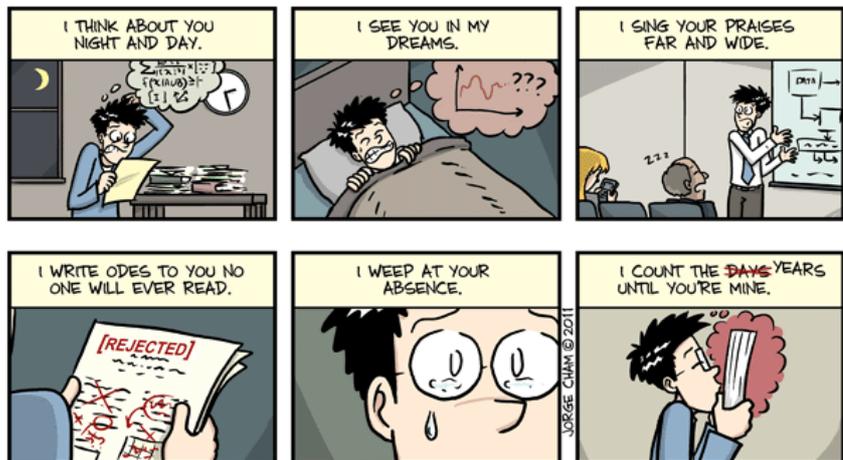
DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa a todos os homens e as mulheres que zelam para que possamos conviver nos céus e chegar de forma segura aos nossos destinos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Nathalia Patricio, minha grande amiga e também companheira durante estes anos universitários, pelas inúmeras palavras de apoio, incentivo e auxílio que recebi durante esta jornada. Palavras estas que me inspiraram a continuar até o final. Agradeço os meus Pais, Paulo e Elvira e a minha família pelo apoio paciente durante estes últimos anos e por estarem ao meu lado me ajudando a superar os momentos mais difíceis da vida. Agradeço o meu orientador, Prof. João Batista, por ter acreditado em mim e me esclarecido sobre os caminhos a seguir para chegar até aqui. Agradeço também os bolsistas de Iniciação Científica que me ajudaram a implementar algumas das ferramentas utilizadas: Vitor Romera, Victor Aldecôa, Artur Mendonça e Francisco Paiva (Xico). Agradeço os meus colegas do GAS pelos momentos de discussões filosóficas, companhia e descontração, especialmente Lúcio Vismari, Mário Corrêa e Ricardo Gimenes. Agradeço os demais professores e funcionários da Escola Politécnica da USP pelo conhecimento transmitido. Agradeço à Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE) da qual fui bolsista, ao CNPq e à FAPESP pelo financiamento ao INCT-SEC, processos 573963/2008-8 e 08/57870-9. Agradeço ainda o programa Poli Cidadã por ter expandido a minha visão para além dos limites da Universidade, no qual tive a oportunidade de aplicar a Engenharia em prol da sociedade. Por fim, agradeço os voluntários da IVAO e da comunidade de simulação, por terem me acompanhado e dado suporte no início desta pesquisa: Fábio Ferragi, Rodrigo Hahnekamp e Anderson Stoffelshaus.

HOW DO I LOVE YOU, THESIS?
LET ME COUNT THE WAYS...



WWW.PHDCOMICS.COM

@fernandogil:

It's done! <http://www.phdcomics.com/comics.php?f=1420> please RT.

RESUMO

Com o crescimento do setor aeronáutico faz-se necessário a criação de novas tecnologias para que a capacidade do sistema possa aumentar sem provocar perdas nos níveis de segurança. Para isso foi criado o CNS/ATM, um paradigma que integra tecnologias de comunicação, navegação e vigilância em um sistema de gerenciamento de tráfego aéreo global. No âmbito das comunicações entre controlador e piloto, o atual sistema de fonia via rádio analógico é substituído por um enlace de dados, chamado de *Controller-Pilot Data Link Communication* (CPDLC). Esta alteração promove polêmica entre aeronautas e autoridades, de forma que é essencial um estudo aprofundado que comprove sua eficácia. Dessa forma, esta pesquisa visa avaliar a segurança do CPDLC quando utilizado em Áreas Terminais do Espaço Aéreo. Para a realização desta pesquisa, foi criada uma metodologia de avaliação de segurança utilizando simuladores de voo, de tráfego aéreo e de comunicação CPDLC combinados com uma análise por meio de modelos de Markov. O procedimento de chegada ao aeroporto de Congonhas, situado na Terminal São Paulo, foi utilizado como referência para aplicação desta metodologia. Os resultados obtidos mostraram que o sistema atual de comunicação, via voz, está no limite do atendimento dos níveis internacionais de segurança para a demanda atual. Contudo, a comunicação por enlace de dados atende, e em alguns casos inclusive melhora, o nível de segurança desta região do espaço aéreo.

Palavras-chave: Controle de Tráfego Aéreo. Comunicação Digital. CPDLC. Áreas Terminais. Metodologia de Avaliação de Segurança.

ABSTRACT

With the growth of the aviation industry it is necessary to create new technologies that can increase the system capacity without loss in the safety levels. Because of this the CNS/ATM was created, a paradigm that integrates communication, navigation and surveillance technologies with a global air traffic management. For the communications between controllers and pilots, the current system of voice over analog radio is being replaced by a data link, called the Controller-Pilot Data Link Communication (CPDLC). This replacement raises debates between airmen and authorities, demanding a detailed study that proves its effectiveness. Thus, this research aims to evaluate the CPDLC safety when used in Terminal Airspace Areas. For this research, was created a methodology for security assessment using flight, air traffic, and CPDLC simulators combined with a Markov model analysis. The Congonhas airport arrival procedure, located in São Paulo Terminal, was used as reference for this methodology application. The results showed that the current system of voice communication is on the limit of fulfilling the international safety levels for the current demand. However, the data link communication addresses, and in some cases even improve, the safety level for this airspace region.

Keywords: Air Traffic Control. Data Link Communication. CPDLC. Terminal Areas. Safety Assessment Methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do voo.....	24
Figura 2 - Visão geral do CNS/ATM. Fonte: < http://editor.stork.com/Stork/5507/Improved_%28CNSATM%29.html >.....	25
Figura 3 - Arquitetura do CPDLC.....	30
Figura 4 - ATN sobre TCP/IP.....	31
Figura 5 - Comparação entre as pilhas ATN/ISO e ATN/IPS. Fonte: (ICAO, 2010a).	32
Figura 6 - Alocação de canais no VDL-2.....	33
Figura 7 - Alocação de canais no VDL-3.....	34
Figura 8 - Alocação temporal no VDL-E.....	35
Figura 9 - Camadas superiores da ATN.....	38
Figura 10 - Primitivas D-START-REQ e D-START-IND.....	40
Figura 11 - Primitivas D-START-RSP e D-START-CNF.....	40
Figura 12 - Diagrama de tempo de início de conexão.....	41
Figura 13 - Diagrama de estados do DS. (Fonte: autor).....	42
Figura 14 - Formato do pacote na ATN.....	43
Figura 15 - Subcamadas do CPDLC.....	44

Figura 16 - Diagrama de tempo de estabelecimento de conexão CPDLC. Fonte: (ICAO, 2009).....	46
Figura 17 - Diagrama de estados do CPDLC. (Fonte: autor).....	47
Figura 18 - Trecho do código ASN.1 do CPDLC.....	48
Figura 19 - Interface CPDLC do controlador. Fonte: < http://tube.7s-b.com/profile/musicalaviator/ >.....	49
Figura 20 - Interface CPDLC do piloto. Fonte: < http://members.optusnet.com.au/~cjr/CPDLC.htm >.....	50
Figura 21 - Atraso da mensagem na distribuição Normal Truncada.....	53
Figura 22 - Microsoft Flight Simulator X.....	61
Figura 23 - X-Plane.....	62
Figura 24 - Flight Gear.....	63
Figura 25 - Interface do controlador na IVAO.....	65
Figura 26 - IvAp.....	66
Figura 27 - RAMS - Visão do aeroporto.....	67
Figura 28 - RAMS - Visão do setor de controle.....	68
Figura 29 - TAAM - Visão geral.....	69
Figura 30 - SIMMOD Plus! - Visão geral.....	70

Figura 31 - Arquitetura da Pipe-SEC.....	74
Figura 32 - Implementação da Pipe-SEC.....	76
Figura 33 - Visão do Simulador CPDLC em camadas.....	78
Figura 34 - Servidor ATN.....	79
Figura 35 - Interface gráfica do DS Test User.....	80
Figura 36 - Interface gráfica do CPDLC Test User.....	81
Figura 37 - Janela inicial do CPDLC Ground User.....	83
Figura 38 - Tela de composição de mensagens.....	83
Figura 39 - Interface do piloto.....	85
Figura 40 - Exemplo de solicitação de nível de voo.....	86
Figura 41 - Tela de recebimento de mensagens.....	86
Figura 42 - Tela de análise dos dados do FSX Recorder.....	88
Figura 43 - Tela de análise das redes de comunicação.....	88
Figura 44 - Visão Geral da Metodologia.....	91
Figura 45 - Aproximação RNAV em Congonhas. Fonte: (MINISTÉRO DA DEFESA, 2010).....	93
Figura 46 - Intervalos de tempo da simulação.....	95

Figura 47 - Proas de entrada e saída.....	96
Figura 48 - Movimentos por hora no aeroporto de Congonhas.....	100
Figura 49 - Pousos por hora no aeroporto de Congonhas.....	100
Figura 50 - Diagrama da Etapa 3.....	103
Figura 51 - Linha de tempo combinada.....	104
Figura 52 - Convergência de duas aeronaves.....	105
Figura 53 - Instante de detecção de Conflito.....	105
Figura 54 - Taxa de falha da rede.....	111
Figura 55 - Modelo de Markov do sistema.....	112
Figura 56 - Mapa do Cenário Base.....	118
Figura 57 - Visualização do Voo 7.....	120
Figura 58 - Distribuição dos tipos de falha para cada demanda.....	121
Figura 59 - Distribuição do Tempo máximo de reação para 20 pousos/h.....	122
Figura 60 - Distribuição do Tempo máximo de reação para 90 pousos/h.....	123
Figura 61 - Probabilidade de Colisão em função da demanda.....	124
Figura 62 - Taxa de Falhas da Rede (λ_{Rede}) em função do movimento de aeronaves.....	125

Figura 63 - Falhas da rede em função da média, para cada demanda.....	126
Figura 64 - Falhas da rede em função do desvio padrão, para cada demanda.....	127
Figura 65 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 15 pousos/hora.....	128
Figura 66 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 90 pousos/hora.....	129
Figura 67 - MTTUF da rede em função dos movimentos.....	130
Figura 68 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 15 pousos/hora.....	148
Figura 69 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 20 pousos/hora.....	149
Figura 70 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 30 pousos/hora.....	149
Figura 71 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 60 pousos/hora.....	150
Figura 72 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 90 pousos/hora.....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de mensagens CPDLC.....	28
Tabela 2 - Características Técnicas dos Protocolos do Meio Físico.....	37
Tabela 3 - Tempos de atraso para classes ATSC.....	51
Tabela 4 - Tempos segundo a FAA.....	52
Tabela 5 - Parâmetros da distribuição Normal Truncada para as classes ATSC.....	52
Tabela 6 - Características dos simuladores.....	71
Tabela 7 - Condições iniciais.....	118
Tabela 8 - Redes de comunicação simuladas.....	125
Tabela 9 - MTTUF [h.109] da rede em função da demanda.....	148
Tabela 10 - Taxa de falhas da rede função da demanda.....	148

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	MOTIVAÇÃO.....	20
1.2	OBJETIVO.....	21
1.3	ORGANIZAÇÃO.....	22
2	COMUNICAÇÃO NO CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO.....	23
2.1	O SERVIÇO DE CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO.....	23
2.1.1	Fases do voo.....	24
2.1.2	O paradigma CNS/ATM.....	25
2.2	COMUNICAÇÃO ANALÓGICA.....	26
2.2.1	Faixa VHF.....	27
2.2.2	Faixa HF.....	28
2.3	COMUNICAÇÕES ENTRE PILOTO E CONTROLADOR VIA ENLACE DE DADOS - CPDLC.....	28
2.3.1	ATN - Aeronautical Telecommunication Network.....	30
2.3.2	Protocolos de Enlace de Dados.....	33
2.3.3	Dialog Service.....	38

2.3.4	CPDLC Service.....	44
2.3.5	Aplicações CPDLC User.....	48
2.4	REQUISITOS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL.....	50
2.5	COMUNICAÇÃO ANALÓGICA VERSUS DIGITAL.....	53
3	SIMULADORES AERONÁUTICOS.....	56
3.1	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS.....	56
3.1.1	Sistema Modelado.....	56
3.1.2	Abrangência da Simulação.....	57
3.1.3	Temporização do Relógio.....	58
3.1.4	Tipo de Evento Simulado.....	59
3.1.5	Interatividade.....	59
3.2	SIMULADORES ESTUDADOS.....	60
3.2.1	Flight Simulator X (FSX).....	60
3.2.2	X-Plane.....	61
3.2.3	Flight Gear.....	62
3.2.4	JSBSim.....	63

3.2.5	IVAO.....	64
3.2.6	VATSIM.....	66
3.2.7	RAMS.....	67
3.2.8	TAAM.....	69
3.2.9	SIMMOD Plus!.....	70
3.3	RESUMO COMPARATIVO.....	71
4	SIMULADOR CPDLC.....	73
4.1	PIPE-SEC.....	73
4.1.1	Modelo Conceitual.....	73
4.1.2	Arquitetura Implementada.....	75
4.2	SIMULADOR CPDLC.....	77
4.2.1	Camada ATN.....	78
4.2.2	Camada Dialog Service.....	80
4.2.3	Camada CPDLC Provider.....	81
4.2.4	Aplicações CPDLC (CPDLC Ground User e CPDLC Air User).....	82
4.2.5	Gerenciador de Experimento.....	87

5	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DA COMUNICAÇÃO.....	89
5.1	OBJETIVO.....	89
5.2	VISÃO GERAL DA METODOLOGIA.....	90
5.3	ENTRADAS DO PROCESSO.....	91
5.3.1	Procedimento de Referência.....	92
5.3.2	Tipos de Rede.....	97
5.3.3	Cobertura do ATCo (CATCo).....	97
5.4	ETAPA 1 – DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS.....	98
5.4.1	Condições Iniciais e Plano de Voo.....	98
5.4.2	Demanda do Espaço Aéreo.....	99
5.5	ETAPA 2 – SIMULAÇÃO FÍSICA.....	101
5.5.1	Trajétórias de voo.....	101
5.6	ETAPA 3 – ANÁLISE DE VOO.....	102
5.6.1	Combinação de voos - Massa de Dados.....	103
5.6.2	Cálculo dos Tempos - Tempo Máximo de Reação ($\Delta T_{Max_Reação}$).....	104
5.6.3	Análise da Trajetórias - Taxa de Aproximações Inseguras (λ_{App}).....	107

5.6.4	Cálculo da Probabilidade de Colisão ($P_{colisão}$)	108
5.7	ETAPA 4 – SIMULAÇÃO DA REDE.....	109
5.7.1	Taxa de Falhas da Rede (λ_{Rede})	110
5.8	ETAPA 5 – ANÁLISE DE SEGURANÇA.....	111
5.8.1	Modelo de Markov do Sistema	111
5.9	DADOS DE SAÍDA DO PROCESSO.....	114
5.9.1	Nível de Segurança (TLS)	114
5.10	HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES DO MODELO.....	114
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	116
6.1	ETAPA 1 – DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS.....	117
6.1.1	Seleção das Trajetórias de Voo	117
6.1.2	Seleção da Demanda do Espaço Aéreo	119
6.2	ETAPA 2 – SIMULAÇÃO FÍSICA.....	119
6.2.1	Geração da Massa de Dados	120
6.3	ETAPA 3 – ANÁLISE DE VOO.....	121
6.3.1	Cálculo da Taxa de Aproximações Inseguras (λ_{App})	121

6.3.2	Cálculo do Tempo Máximo de Reação (Δt_{Max_Reac}).....	122
6.3.3	Cálculo da Probabilidade de Colisão (PColisão).....	123
6.4	ETAPA 4 – ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DA REDE.....	124
6.4.1	Seleção dos Tipos de Rede.....	124
6.4.2	Cálculo da Taxa de Falhas da Rede (λ_{Rede}).....	125
6.5	ETAPA 5 – ANÁLISE DE SEGURANÇA.....	127
6.5.1	Cálculo da Cobertura do ATCo (CATCo).....	127
6.5.2	Cálculo do Nível de Segurança (TLS).....	128
7	CONCLUSÃO.....	132

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Devido ao barateamento das passagens aéreas que vem ocorrendo nos últimos anos, o movimento de aeronaves tem aumentado no mundo todo, com cada vez mais pessoas utilizando este meio de transporte e, portanto, com suas vidas dependendo da correta operação do sistema de transporte aéreo.

Atualmente, o sistema de controle de tráfego aéreo faz uso de enlaces analógicos de rádio para a comunicação entre pilotos e controladores. Porém, esse enlace tem diversos problemas que dificultam o controle de um maior número de aeronaves no espaço aéreo, tais como interferências por rádios-pirata (ocasionando perda temporária da comunicação ou até mal-entendidos), saturação do canal (quando a transmissão de uma mensagem bloqueia muito tempo o enlace) e a má compreensão do idioma Inglês por não nativos.

Como uma forma de evitar esses problemas, a área da aviação está evoluindo este sistema de comunicação através do uso das **Comunicações entre Controlador e Piloto via Enlace de Dados** (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2009a), do inglês, *Controller Pilot Data-Link Communications* (CPDLC) (ICAO, 1999). O CPDLC permite uma maior automação no processo de controle das aeronaves no espaço aéreo e uma maior capacidade de comunicação, aumentando assim o número de aeronaves que podem compartilhar uma mesma região do espaço aéreo simultaneamente.

Porém, uma preocupação que existe com a inserção desta tecnologia é quanto a segurança (*safety*) do sistema de transporte aéreo como um todo. A substituição das tecnologias usadas atualmente pelo CPDLC insere novos modos de falha, ainda desconhecidos, no sistema. Assim, faz-se necessária uma avaliação de segurança

do CPDLC para garantir que a segurança no espaço aéreo esteja acima de um nível aceitável (MASSIMINI ET AL., 1999).

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto do CPDLC na segurança do espaço aéreo em Áreas Terminais. Fazendo isso medindo-se a influência da variação do atraso de envio de mensagens na rede de comunicações sobre a variação das métricas de segurança de uma região do espaço aéreo para diferentes patamares de demanda de tráfego de aeronaves.

Nesta pesquisa foi construída uma implementação do CPDLC e utilizada a Plataforma Integrada para Ensaios de Sistemas Embarcados Críticos (Pipe-SEC), desenvolvida pelo Grupo de Análise de Segurança (GAS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), para a obtenção de dados experimentais do sistema aeronáutico.

Para cumprir o objetivo proposto, foi desenvolvida uma metodologia combinando-se técnicas de avaliação de segurança conhecidas com o uso de simuladores de voo, de tráfego aéreo e de CPDLC. Os resultados da aplicação desta metodologia em Áreas Terminais podem ser utilizados para balizar a definição de requisitos de uma rede de comunicação digital para suporte ao CPDLC.

Assim, foi realizada uma avaliação do procedimento de chegada ao aeroporto de Congonhas, na Terminal São Paulo (TMA-SP), de forma a possibilitar a avaliação do tanto do sistema atual de comunicação por voz quanto de redes para comunicação digital (CPDLC).

1.3 ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação está organizada em três partes. A parte inicial apresenta uma revisão bibliográfica da comunicação no contexto do controle de tráfego aéreo, no Capítulo 2, e dos simuladores aeronáuticos existentes, no Capítulo 3.

Em seguida, a segunda parte descreve o Simulador CPDLC, no Capítulo 4, e a Metodologia Para Avaliação da Segurança, no Capítulo 5, desenvolvidos nesta pesquisa.

Por fim, a análise dos resultados obtidos na aplicação da metodologia na Terminal São Paulo é apresentada, no Capítulo 6, sendo complementada pelas considerações finais e propostas de trabalhos futuros, no Capítulo 7.

2 COMUNICAÇÃO NO CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO

“GAS2222, Torre São Paulo, livre decolagem pista uno sete direita, ventos uno oito zero graus, zero meia nós.”

A comunicação é importante para o relacionamento das pessoas. Nos sistemas críticos em segurança, especialmente no controle de tráfego aéreo, a comunicação é fundamental para a coordenação segura das aeronaves (WICKENS ET AL., 1997).

Neste capítulo será apresentado o papel da comunicação no controle de tráfego aéreo, as características do sistema atual de comunicação, por voz, e do sistema de comunicação digital. Por fim, é feita uma análise dos prós e contras de ambos os sistemas.

2.1 O SERVIÇO DE CONTROLE DE TRÁFEGO AÉREO

O serviço de transporte aéreo permite que pessoas e cargas sejam transportadas de um lugar para o outro, usando a via aérea. Dentre os veículos utilizados para tal transporte, chamados genericamente de aeronaves, estão os aviões, helicópteros, dirigíveis, balões e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

Para que o transporte aéreo ocorra de forma segura criou-se o serviço de controle de tráfego aéreo (ATC). Ele tem como objetivo prover um fluxo seguro e eficiente de aeronaves no espaço aéreo (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2009b).

No ATC, existe o papel do controlador (ATCo) que é o agente responsável pelo controle das aeronaves no espaço aéreo. Também há o piloto que tem sob sua responsabilidade a condução da aeronave. Para conduzir a aeronave, o piloto executa três ações: voar, navegar e comunicar-se. Os instrumentos de bordo captam a posição da aeronave, permitindo a navegação. O sistema de rádio mantém uma

comunicação bidirecional constante entre piloto e controlador. Por sua vez, o controlador utiliza-se do console radar, que apresenta em uma tela o posicionamento da aeronave e permite que o ATCo tenha uma visão ampla da região de controle.

O Serviço de Tráfego Aéreo é regulamentado internacionalmente pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO), ou Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) em português. No Brasil, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) presta o serviço de ATC, nos Estados Unidos, a *Federal Aviation Administration* (FAA) regulamenta o setor enquanto a Eurocontrol é a responsável na Europa.

2.1.1 Fases do voo

As fases do voo são Taxiamento (de Saída), Decolagem, Subida, Rota, Descida, Aproximação, Pouso e Taxiamento (de Chegada). A Figura 1 apresenta estas fases. No taxiamento de saída, as aeronaves saem do terminal no aeroporto de origem e deslocam-se pelo chão até a pista. Durante a decolagem, a aeronave sai do solo e alça voo. Na fase de subida, são realizadas manobras para se alcançar a rota desejada. Durante o voo em rota, há uma menor carga de trabalho para os pilotos, pois a aeronave encontra-se estabilizada.

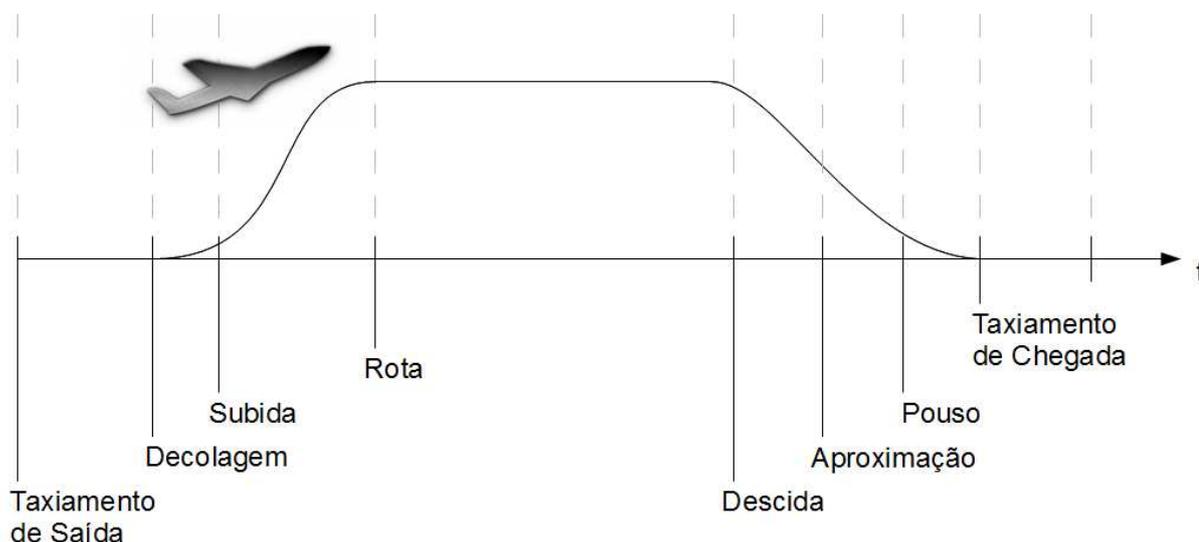


Figura 1 - Fases do voo

Próximo ao destino, na fase de Descida também são efetuadas manobras para sequenciamento. Na fase de Aproximação, a aeronave efetua manobras finais para interceptar a rampa de pouso. No Pouso, a aeronave toca o solo do aeroporto de destino, e por fim, no Taxiamento de Chegada, esta para no terminal final.

2.1.2 O paradigma CNS/ATM

O CNS/ATM (*Communications, Navigation, Surveillance Systems for Air Traffic Management*) é a forma atual de se enxergar o Sistema de Controle de Tráfego Aéreo, através do uso integrado de diversas tecnologias para comunicação, navegação, vigilância e gerenciamento do tráfego aéreo. Além de se preocupar com a integração do sistema como um todo, o CNS/ATM também propõe a mudança de algumas tecnologias por outras mais atuais. Ele foi apresentado em 1991 e vem sendo estudado e implantado ao redor do mundo (ICAO, 2007). A implantação deste paradigma está sendo incremental e de forma que não cause descontinuidade nas interfaces entre os espaços aéreos de cada país. A Figura 2 apresenta a arquitetura geral do CNS/ATM.

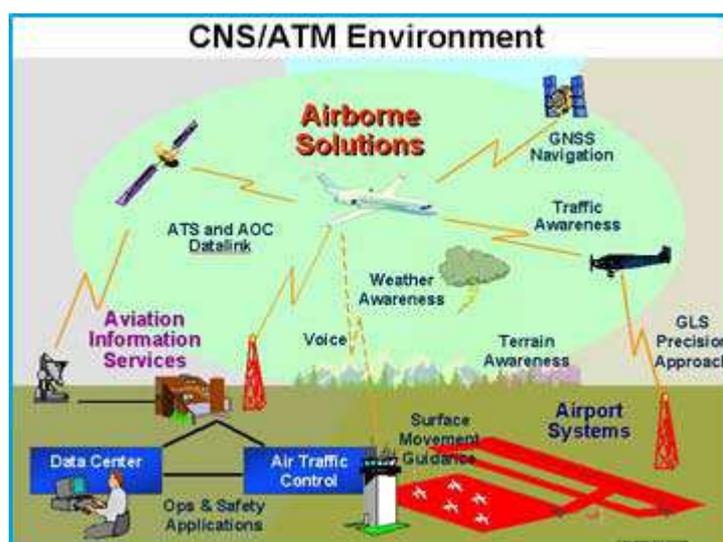


Figura 2 - Visão geral do CNS/ATM.

Fonte: <http://editor.stork.com/Stork/5507/Improved_%28CNSATM%29.html>

Atualmente a comunicação é feita através de enlaces analógicos de voz. Porém, no paradigma CNS/ATM, a comunicação (*Communication*) será realizada sobre enlaces digitais, conferindo maior capacidade e qualidade ao serviço de controle de tráfego aéreo. Além disso, o uso de mensagens digitais permitem um maior grau de automação tanto na aeronave quanto nos órgãos do ATC.

A navegação (*Navigation*), por sua vez, passa a ser baseada em satélite, ao invés dos atuais sistemas de rádio-auxílio. A navegação por *Geographical Navigation Satellite Systems* (GNSS) é mais precisa do que a atual e possui maior área de cobertura. Ela compreende alguns sistemas, sendo que as principais são o GPS (americano) e a GALILEO (europeu). Porém, este método de navegação não poder ser o único da aeronave (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2009c).

A vigilância (*Surveillance*) no CNS/ATM passa a ser realizada através do *Automatic Depended Surveillance System* (ADS) em substituição aos radares usados atualmente. Este sistema pode ser aplicado de duas formas, por difusão (ADS-B) ou por contrato (ADS-C). Ambos utilizam informações de posicionamento fornecidas pelos GNSS.

No paradigma CNS/ATM, o gerenciamento do tráfego aéreo passa a ser feito de forma integrada e colaborativa. Por meio de sistemas de decisão colaborativo, autoridades aeronáuticas e aeroportuárias, empresas aéreas, pilotos e usuários podem expor suas opiniões automaticamente sobre ações no sistema.

2.2 COMUNICAÇÃO ANALÓGICA

No sistema atual, as comunicações entre controladores e pilotos são feitas por voz utilizando-se de enlaces analógicos de rádio VHF, com a banda entre 118MHz e 136MHz, e rádio HF. Estes enlaces de dados são definidos pela ITU especificamente para este fim.

Por exemplo, quando uma aeronave está aproximando-se do aeroporto de destino, pode haver o seguinte diálogo entre o controlador da Área Terminal e o piloto do voo GAS2222:

Aeronave: Controle São Paulo, GAS2222, em descida para Congonhas.

Controlador: GAS2222, Controle São Paulo, contato radar, prossiga aproximação RNAV para a pista 17R.

Aeronave: Afirmativo, 2222.

Aeronave: Controle São Paulo, GAS2222, estabilizado na final.

Controlador: GAS2222, chame Torre São Paulo 127 decimal 15 para completar a aproximação.

Aeronave: Chamará 127 decimal 15, 2222.

Neste diálogo, a aeronave informa a entrada na região controlada. Em seguida, o controlador lhe dá instruções de qual procedimento seguir. Na sequência, o piloto informa que alcançou o final do procedimento e finalmente, o controlador da Terminal transfere a aeronave para o próximo controlador (da Torre). No exemplo, “127 decimal 15” refere-se à frequência 127,15MHz do rádio VHF.

2.2.1 Faixa VHF

A comunicação na faixa *Very High Frequency* (VHF) ocorre entre os 118MHz e 136MHz, modulada em amplitude (AM). Normalmente utiliza canais de 25kHz, porém, com o crescimento pela demanda de comunicações, na Europa utiliza-se

canais com espaçamento de 8.33KHz. Atualmente é a faixa mais utilizada para comunicação aeronáutica.

2.2.2 Faixa HF

A comunicação por *High Frequency* (HF) existe principalmente nas regiões oceânicas, pois este comprimento de onda possui um alcance maior em relação ao VHF, porém a sua qualidade é inferior.

2.3 COMUNICAÇÕES ENTRE PILOTO E CONTROLADOR VIA ENLACE DE DADOS - CPDLC

As comunicações entre controlador e piloto via enlace de dados foi definida pela OACI dentro do paradigma CNS/ATM e chamada de CPDLC (ICAO, 1999). Ela é utilizada para a troca de informações entre controladores e pilotos durante o serviço de controle de tráfego aéreo. A Tabela 1 apresenta os tipos de mensagens trocadas no CPDLC.

Tabela 1 - Tipos de mensagens CPDLC.

Troca de informações gerais	
Autorizações	Entrega
	Solicitação
	Resposta
Vigilância de altitude e de identificação	
Monitoramento de posicionamento atual e planejado	
Avisos	Solicitação
	Resposta
Mensagens de gerenciais do sistema	
Situações de emergência	

O CPDLC é composto por equipamentos em solo e embarcados. A Figura 3 apresenta a arquitetura geral do sistema. No solo encontram-se a Interface Humano Computador (IHC) do controlador de tráfego, o servidor gerenciador de comunicações e o transmissor. Na aeronave encontram-se o receptor e a interface do piloto.

O CPDLC é integrado a IHC do controlador e por meio desta visualiza as informações de posição e os planos de voo enviados através do radar e da rede de comunicações respectivamente. Na IHC existem menus que permitem a seleção entre as mensagens padronizadas.

O servidor gerenciador de comunicações é o responsável por rotear as mensagens, tanto aquelas enviadas às aeronaves quanto as mensagens entre controladores, no caso de uma coordenação. A coordenação é realizada sempre que o tráfego é transferido entre setores. Neste servidor pode haver gravação de um histórico de mensagens e também a geração de mensagens automáticas, contendo informações meteorológicas, por exemplo.

O transmissor é conectado a rede cabeada e a rede sem fio, enviando as mensagens de uma para a outra. A rede sem fio realiza o transporte das mensagens até a aeronave, na qual estas são processadas pelo receptor embarcado.

A interface do piloto exibe as mensagens recebidas. Como é integrada ao computador de bordo, pode-se realizar automaticamente as alterações solicitadas pelo controle diretamente no piloto automático, após uma confirmação do piloto. Isso reduz erros no procedimento. O piloto possui ainda um menu com as mensagens padrão, para evitar a digitação de um texto extenso.

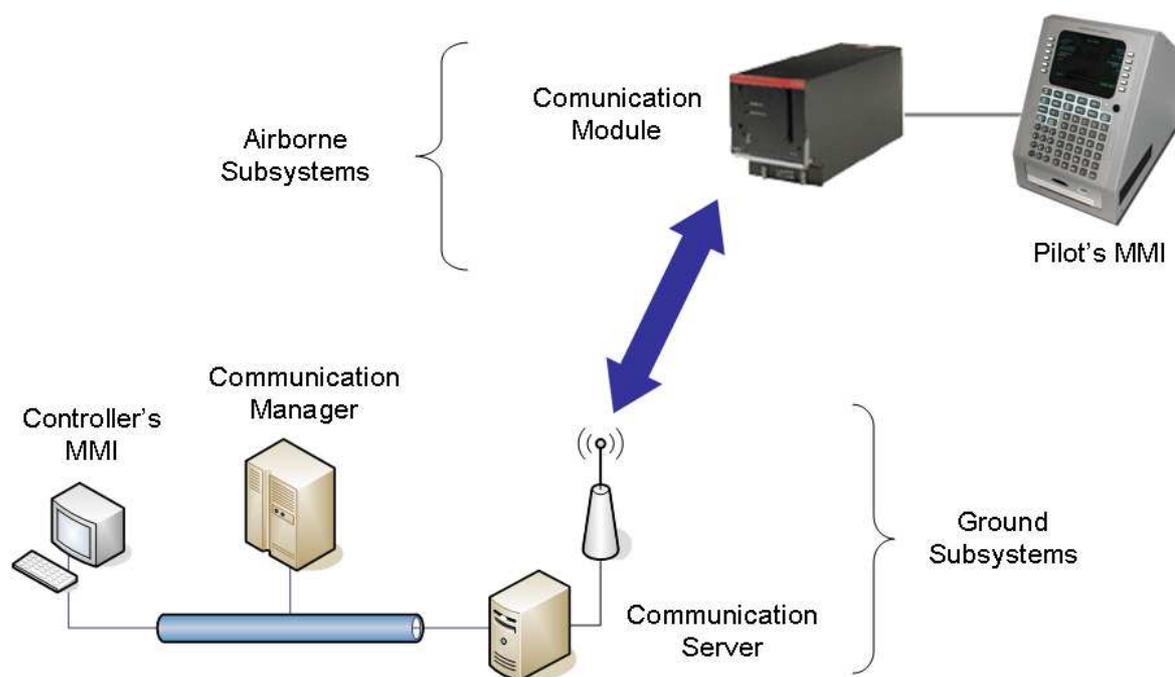


Figura 3 - Arquitetura do CPDLC.

2.3.1 ATN - *Aeronautical Telecommunication Network*

A *Aeronautical Telecommunication Network* (ATN), ou rede de telecomunicações aeronáuticas, foi criada para permitir a interoperabilidade entre os diversos serviços que estavam sendo criados para o CNS/ATM. Dentro deste contexto, tornou-se necessária a padronização de uma rede global. Nela todas as aplicações poderiam compartilhar o mesmo meio físico e serem roteadas por diversos enlaces. Inicialmente, a ATN foi especificada baseando-se no modelo ISO/OSI de 7 camadas. Com o crescimento da internet, fez-se necessária a sua adaptação e padronização para o modelo *Internet Protocols Suite* (IPS), também conhecido como modelo TCP/IP de 5 camadas.

O objetivo da ATN é ser a rede aeronáutica para todos os tipos de comunicação. Como entidades que utilizam a ATN, estão aeronaves (pilotos), órgãos ATC (controladores), veículos de solo (reboques, etc), empresas aéreas e autoridades aeronáuticas. Permitindo assim o uso de várias aplicações, tais como CPDLC, FIS e ADS.

2.3.1.1 Especificação ATN/IPS

A Figura 4 apresenta a especificação da ATN baseada na pilha TCP/IP. Esta é a especificação mais recente do CPDLC, definida em (ICAO, 2010a). A diferença entre esta especificação e a original reside na camada 5 da pilha TCP/IP.

Acima da camada de transporte (TCP), existe a camada *Dialog Service* (DS), responsável pelo gerenciamento do diálogo entre duas aplicações da ATN.

Acima dessa, há a camada Aplicação CPDLC. Ela pode ser dividida em duas subcamadas. A primeira delas representa a aplicação que faz a interface com o usuário. Esta subcamada possui duas especializações: a CPDLC *Ground User* e a CPDLC *Air User*, utilizadas respectivamente pelo controlador e pelo piloto. A outra subcamada é o CPDLC *Service*, responsável por prover a comunicação fim-a-fim entre duas destas aplicações como, por exemplo, entre piloto e controlador ou entre controladores.

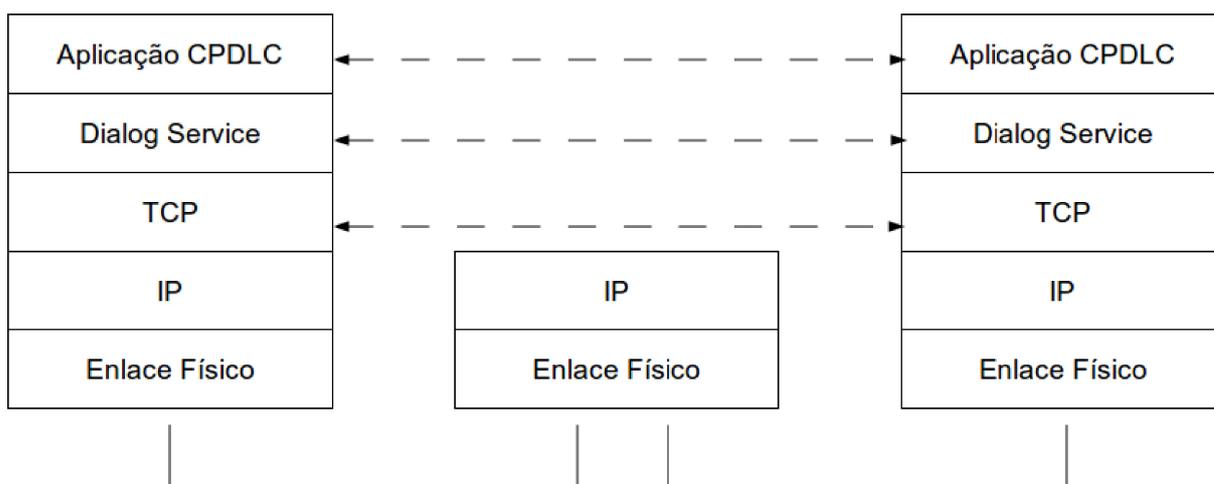


Figura 4 - ATN sobre TCP/IP.

2.3.1.2 Especificação ATN/ISO

A primeira especificação definida pela OACI para a ATN foi baseada no modelo OSI. Esta foi a primeira especificação, definida em (ICAO, 1999), na qual o CPDLC foi descrito. Esta especificação continua sendo mantida atualmente em paralelo com a ATN/IPS por questões de interoperabilidade.

A diferença entre a ATN/ISO e a ATN/IPS está somente nas camadas inferiores, de transporte, rede, enlace e física. No ATN/ISO a camada *Dialog Service* é a camada de sessão da pilha OSI. As camadas *CPDLC Service* e *CPDLC Application* formam a camada de aplicação.

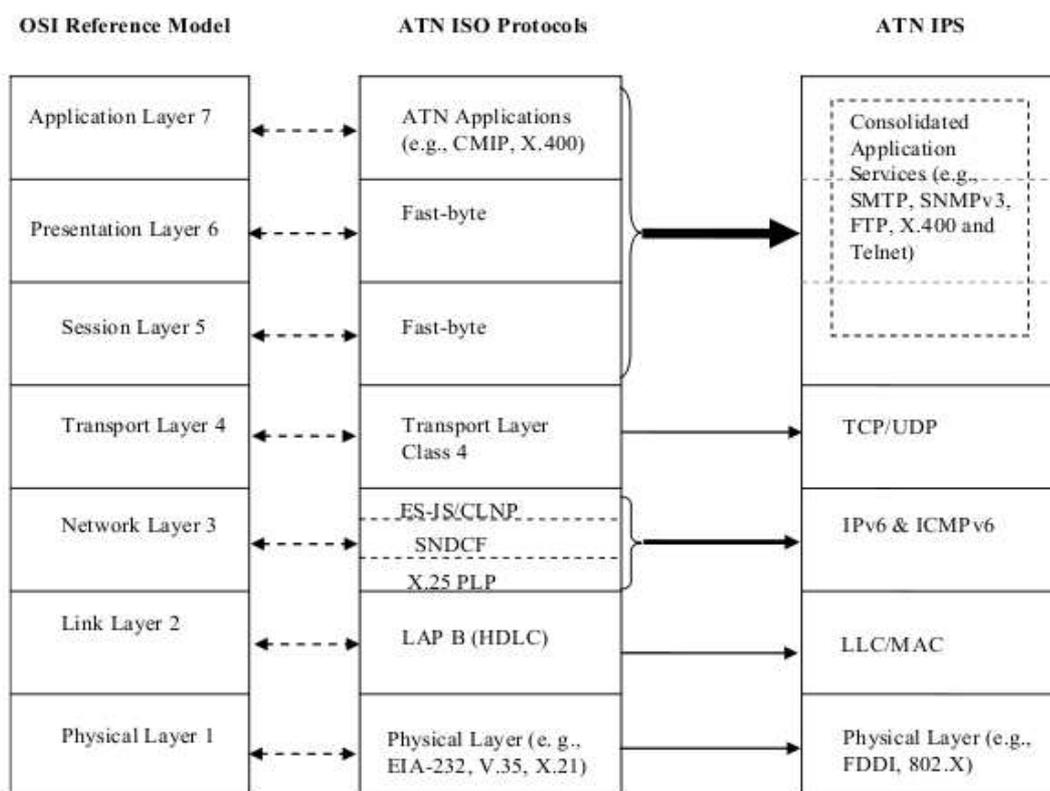


Figura 5 - Comparação entre as pilhas ATN/ISO e ATN/IPS. Fonte: (ICAO, 2010a)

2.3.2 Protocolos de Enlace de Dados

Para a camada de enlace de dados é possível utilizar-se tanto de comunicação cabeada quanto a sem fio. Para a cabeada são utilizados os protocolos convencionais da internet. Já no caso de comunicação sem fio, existem diversas propostas de protocolos para a implementação do link de dados. Muitos destes utilizam a mesma faixa de frequência da comunicação atual via VHF, os chamados VHF Data Link (VDL) (EUROCONTROL, 2008). Alguns compartilham faixas utilizadas por outros equipamentos aeronáuticos ou propõe a utilização de uma nova banda.

2.3.2.1 VDL Modo 2

O protocolo VDL modo 2 tem uma taxa bruta de 31.5kbps, porém sua capacidade líquida estimada é de apenas 4kbps. Ele é um protocolo que opera no modo CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), o que significa que enquanto uma estação está transmitindo, o canal permanece ocupado (GUNAWARDENA; RANKIN, 2001). Para a sua utilização é necessária a alocação de canais de 25kHz alternados, ou seja, deve haver um “canal” de separação entre os canais utilizados.

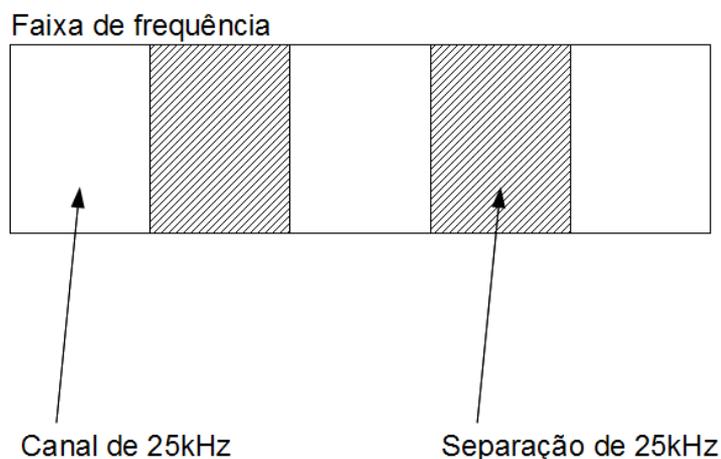


Figura 6 - Alocação de canais no VDL-2.

A Figura 6 apresenta a alocação dos canais e a separação necessária. Este protocolo está em uso atualmente nos testes com CPDLC no Atlântico Sul, sob administração brasileira (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2004).

2.3.2.2 VDL Modo 3

O VDL modo 3 utiliza a tecnologia TDMA (*Time Division Multiple Access*) e permite que existam 3 canais lógicos em um canal físico de 25kHz. Cada canal lógico pode acomodar um canal de dados ou um canal de voz de 8.33kHz. Normalmente são utilizados 2 canais de dados e 1 canal de voz, possibilitando a transmissão líquida de 12.4kbps (31.5kbps bruto) (GRINER JR, 2004) e (HARRIS CORPORATION, 2003).

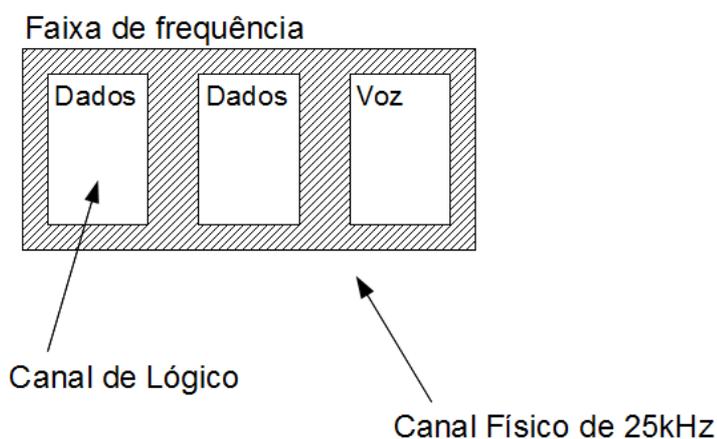


Figura 7 - Alocação de canais no VDL-3.

Este protocolo é o principal candidato para substituição do VHF analógico no planejamento da FAA (FAA, 1998b). Entretanto, para ser utilizado na Europa, é necessária a alocação de 3 canais de 8.33kHz sequenciais (STUDENBERG, 2006).

2.3.2.3 VDL Modo E

O protocolo VDL modo E é uma modificação do VDL modo 3. Cada canal utiliza 8.33kHz e provê 2 circuitos de comunicação independentes. Dessa forma o protocolo permite a utilização de 6 canais de comunicação em um canal físico de 25kHz. O VDL-E utiliza o mesmo receptor do VDL-3, sendo necessária apenas uma atualização do software (STUDENBERG, 2007) e (STUDENBERG, 2005).

Um canal físico de 8.33kHz é dividido no tempo em dois circuitos de comunicação de dados. Um para o *downlink* e outro para *uplink*. A Figura 8 apresenta a alocação no tempo de um canal físico, ou *frame* da rede. Os blocos representados em azul (Uplink M e M) transmitem os sinais de controle. O conteúdo propriamente dito das mensagens é transmitido em *Uplink Data* e *Downlink Data*.

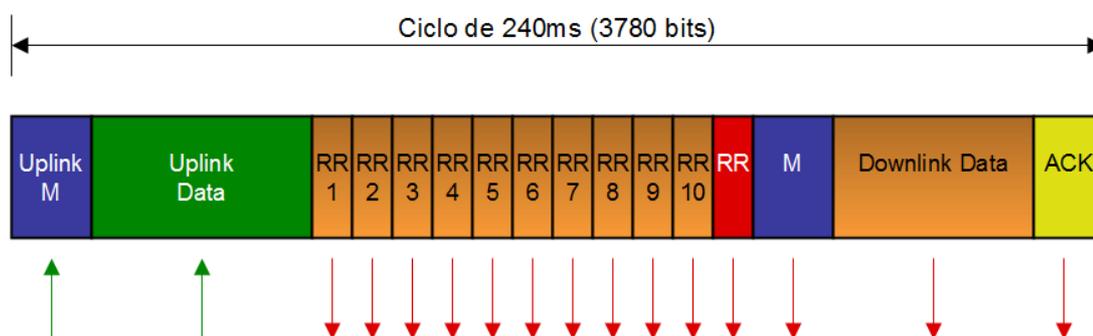


Figura 8 - Alocação temporal no VDL-E.

A cada *frame*, sempre há espaço para a transmissão de uma mensagem *uplink* (do controlador para o piloto). Porém, cada piloto pode solicitar o envio de um *downlink* (do piloto para o controlador) nos blocos RR. Os blocos RR 0 a RR 10 acomodam 10 aeronaves, enquanto que o bloco RR final, em vermelho, é utilizado para qualquer aeronave que esteja em emergência. Por fim, o bloco ACK é utilizado para que as aeronaves confirmem o recebimento da mensagem do controlador. Dessa forma, o protocolo VDL-E permite a acomodação de até 1500 aeronaves dentro dos limites de segurança (STUDENBERG, 2005).

2.3.2.4 VDL Modo 4

O protocolo VDL modo 4 utiliza canais de 25kHz com controle de acesso do tipo TDMA. A taxa bruta de transmissão é de 19.2kbps, com 14kbps líquidos de capacidade real da rede. A grande vantagem do VDL-4 é que ele pode ser utilizado independente da existência de infraestrutura em terra, pois utiliza os canais já existentes na faixa VHF. Também é um forte candidato para as comunicações da próxima geração da ATN (FISTAS, 2003).

2.3.2.5 SSR Modo S

O SSR modo S possui dois tipos de protocolo: o EHS (*Mode S Enhanced Surveillance*) e o 1090 ES. O modo EHS permite a comunicação ar-terra e terra-ar (entre piloto e controlador e vice-versa) através da inclusão de dados na mensagem de *downlink* dos radares secundários. Entretanto, esta tecnologia não permite o envio de mensagens ar-ar (diretamente entre pilotos). O 1090 ES é uma variante do protocolo EHS (GRINER JR, 2004) a qual permite o envio de mensagens maiores, podendo ser utilizado para o CPDLC.

Segundo (GIL ET AL., 2008), pode-se acomodar 1280 aeronaves sem infringir os níveis de segurança. Porém, este protocolo utiliza a mesma banda do TCAS (equipamento que detecta aeronaves próximas e indica manobras em caso de iminência de colisão). Com isso, há preocupações em congestionar esta faixa e degradar o funcionamento do TCAS.

2.3.2.6 UAT

O UAT, ou *Universal Access Transceiver*, trabalha na faixa de 960MHz e utiliza canais de 2 a 3 Mhz (GARCIA ET AL., 2007) com uma taxa líquida de transmissão

da ordem de 1Mbps. O UAT utiliza satélites como meio de comunicação de forma a permitir o acesso globalmente. Este protocolo suporta a utilização do serviço ADS-B e pode ser utilizado também para o CPDLC.

Ainda em fase de desenvolvimento, a OACI publicou em 2010 o seu primeiro manual de utilização (ICAO, 2010b). Por possuir uma abrangência global e uma alta taxa de transmissão, o UAT é um forte concorrente para ser utilizado como padrão na ATN.

2.3.2.7 Resumo Comparativo

A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo das características técnicas dos protocolos citados.

Tabela 2 - Características Técnicas dos Protocolos do Meio Físico.

Protocolo	VDL-2	VDL-3	VDL-E	VDL-4	SSR-S	UAT
Faixa de Frequência	118MHz a 136MHz	118MHz a 136MHz	118MHz a 136MHz	118MHz a 136MHz	1030MHz e 1090MHz	900MHz
Largura do Canal	25kHz	8.33kHz	8.33kHz	25kHz	-	-
Taxa Líquida	4kbps	12.4kbps	15kbps	14kbps	1Mbps a 4Mbps	Acima de 1Mbps
Método de acesso	CSMA	TDMA	TDMA	TDMA	CSMA	CSMA
Ar-Terra	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Terra-Ar	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Ar-Ar	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Uso com CPDLC	Brasil FAA	Eurocontrol	-	Eurocontrol FAA	-	-

Como pode ser visto, os protocolos VDL utilizam a mesma faixa do VHF analógico. Isto permite a implementação gradual do sistema. Em contrapartida, o protocolo UAT utiliza um meio de transmissão diferente (satélite) possibilitando a criação de

sistemas de comunicação mais disponíveis e com capacidade maior. O SSR-S poderá ser utilizado durante a fase de transição, porém, conforme apresentado, o seu uso reduz a disponibilidade do TCAS.

2.3.3 Dialog Service

O *Dialog Service* (DS) é o serviço de gerenciamento de diálogo fim-a-fim da ATN, cuja especificação completa encontra-se em (ICAO, 2010a). Este serviço permite a troca de informações entre duas entidades da ATN. Esta camada dá suporte aos serviços da ATN, como por exemplo, o CPDLC. O serviço é estruturado de forma que duas entidades, chamadas *DS User*, possam se comunicar via ATN sobre IPS ou OSI.

Nesta pesquisa será utilizado a especificação ATN/IPS. Nesta especificação, o serviço provido pelo DS pode ser orientado à conexão, quando este utiliza-se do TCP ou não orientado à conexão, quando este utiliza-se o UDP. No caso do serviço não orientado à conexão, o DS é responsável pelos mecanismos de confiabilidade de entrega de dados.

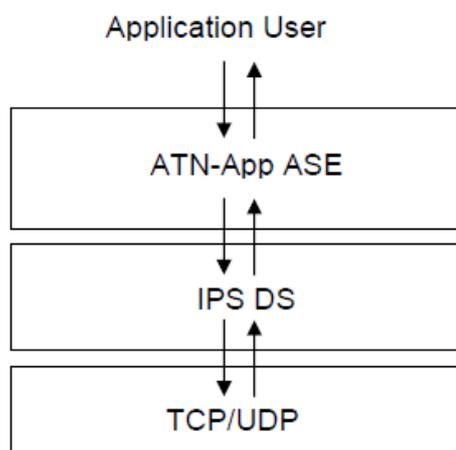


Figura 9 - Camadas superiores da ATN.

Observando-se as camadas superiores da ATN, apresentadas na Figura 9, nota-se que o DS situa-se entre a aplicação da ATN e a camada de transporte (TCP ou UDP). As trocas de informações entre as camadas são feitas usando-se as primitivas, que disparam eventos na camada de destino.

2.3.3.1 Primitivas de Comunicação

No DS, existem os seguintes tipos de primitivas de comunicação: D-START, D-DATA, D-UNIT-DATA, D-END, D-ABORT e D-P-ABORT.

A diretiva D-START é utilizada pela entidade que deseja iniciar a comunicação. Esta diretiva inicia um serviço com confirmação de recebimento. Os dados da aplicação são transmitidos de forma bidirecional por meio da diretiva D-DATA. Para o caso de mensagens emergenciais, existe a D-UNIT-DATA é usado para transmissão de mensagem sem o prévio estabelecimento de conexão.

A diretiva D-END encerra normalmente o serviço, sendo que as diretivas D-ABORT e D-P-ABORT são utilizadas para informar a outra parte que o serviço foi abortado de forma prematura. A diferença entre estas duas diretivas reside sobre quem decide terminar a comunicação, sendo que a última é enviada por quem a iniciou.

Para cada tipo, existem 4 variações: REQ, IND, RSP e CNF. Por exemplo, para o tipo D-START, existem D-START-REQ, D-START-IND, D-START-RSP, D-START-CNF, respectivamente para requisitar, indicar, responder e confirmar.

A primitiva D-START-REQ é utilizada para um DS User, por exemplo DS User A, solicitar o início de uma conexão. O DS Provider mapeia esta primitiva em um pacote D-START com o atributo REQ e o envia para a ATN. No outro extremo da comunicação, o outro DS Provider recebe o pacote e dispara um evento D-START-IND no DS User B, como apresentado na Figura 10.

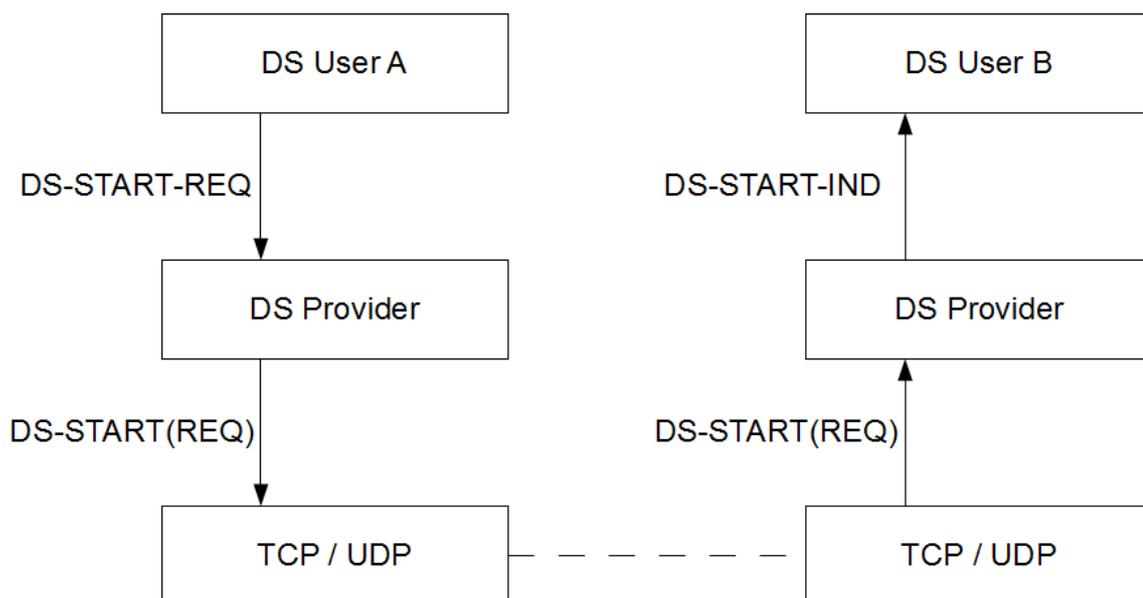


Figura 10 - Primitivas D-START-REQ e D-START-IND.

De forma análoga, na Figura 11, a primitiva D-START-RSP é utilizada por B para responder se aceitou ou não a conexão. Esta resposta é mapeada no pacote D-START com o atributo de resposta. No outro extremo, este pacote é recebido e o DS Provider dispara um evento de D-START-CNF no DS User A.

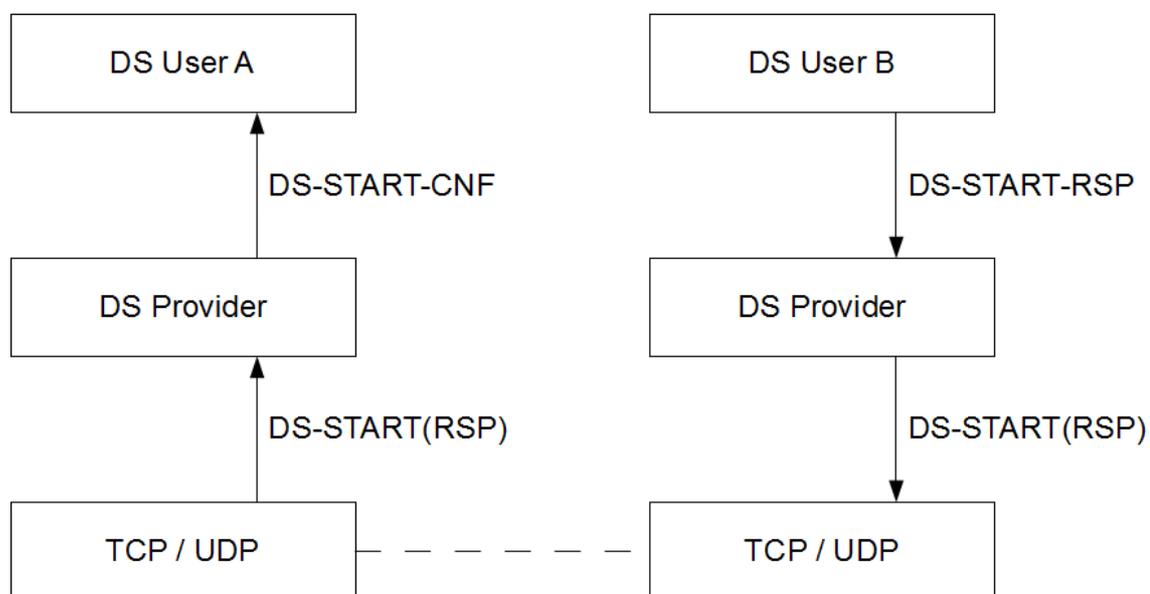


Figura 11 - Primitivas D-START-RSP e D-START-CNF.

2.3.3.2 Diagrama de Estados e de Tempo

Analisando-se temporalmente o protocolo DS, pode-se observar na Figura 12 que o início de uma conexão implica na troca de 2 mensagens na rede ATN. Este comportamento repete-se para quase todos os demais tipos de primitivas, com exceção do D-P-ABORT, pois como esta mensagem tem um caráter é unilateral, não há espera pela sua confirmação de recebimento.

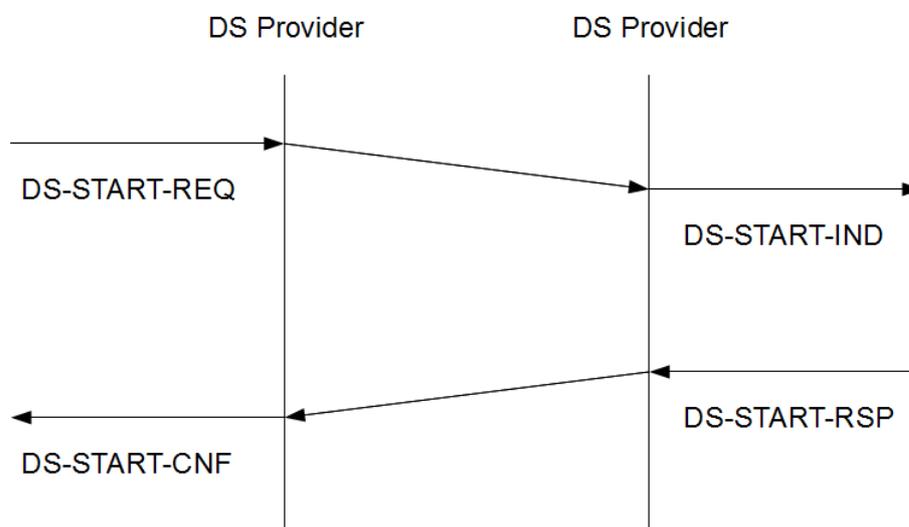


Figura 12 - Diagrama de tempo de início de conexão.

O funcionamento completo do protocolo ocorre segundo o diagrama de estados apresentado na Figura 13.

2.3.3.3 Formato de Mensagens

As mensagens enviadas pelo DS possuem o formato *ATN Packet*, mostrado na Figura 14. Este formato de pacote possui duas partes. A parte de tamanho fixo é o cabeçalho do pacote, onde são informados os campos presentes na parte variável e a sua primitiva de comunicação. Na parte variável, estão presentes os campos especificados no cabeçalho. O tamanho mínimo do pacote é 24 *bytes*, compreendendo apenas o cabeçalho, enquanto que o tamanho máximo é de 64Kbytes.

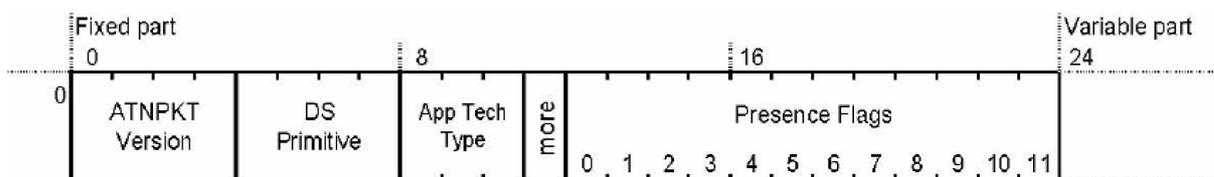


Figura 14 - Formato do pacote na ATN.

O cabeçalho, parte fixa, é dividido em 5 campos. O campo *ATNPKT Version*, com 4 bits, informa a versão da especificação utilizada. O campo *DS Primitive*, com 4 bits, indica qual é primitiva cujo pacote representa. O campo *App Tech Type*, com 3 bits, informa qual é a aplicação ATN que está sendo utilizada. O campo *more*, com 1 bit, é um indicador de fragmentação do pacote. O campo *Presence Flags*, com 12 bits, especifica quais campos de dados estão contidos na parte variável.

Dentre os campos da parte variável, existem: *Source ID*, *Destination ID*, *Sequence Number*, *Inactivity time*, *Called Peer ID*, *Calling Peer ID*, *Content Version*, *Security Indicator*, *Quality of Service*, *Result*, *Originator* e *User Data*. Dentre estes, cabe destacar o campo *Result*, utilizado para enviar o valor de respostas como a do D-START-RSP, o campo *User Data*, que carrega os dados da aplicação, e o campo *Quality of Service*, que especifica a classe ATSC (apresentada no item 2.4) mínima da ATN que deve ser utilizada.

2.3.4 CPDLC Service

Uma das aplicações ATN que utilizam o DS para se comunicar é o CPDLC. O CPDLC *Service* é o serviço de comunicação entre piloto e controlador na ATN (ICAO, 2009). Sua função é fornecer um meio de comunicação bidirecional durante todo o serviço de controle de tráfego aéreo. Da mesma forma que o DS, o CPDLC é dividido em duas partes: a camada CPDLC *Provider* e a camada de aplicação de usuário CPDLC *User*. Além disso, a camada CPDLC *Provider* é uma aplicação DS *User* como mostrado na .

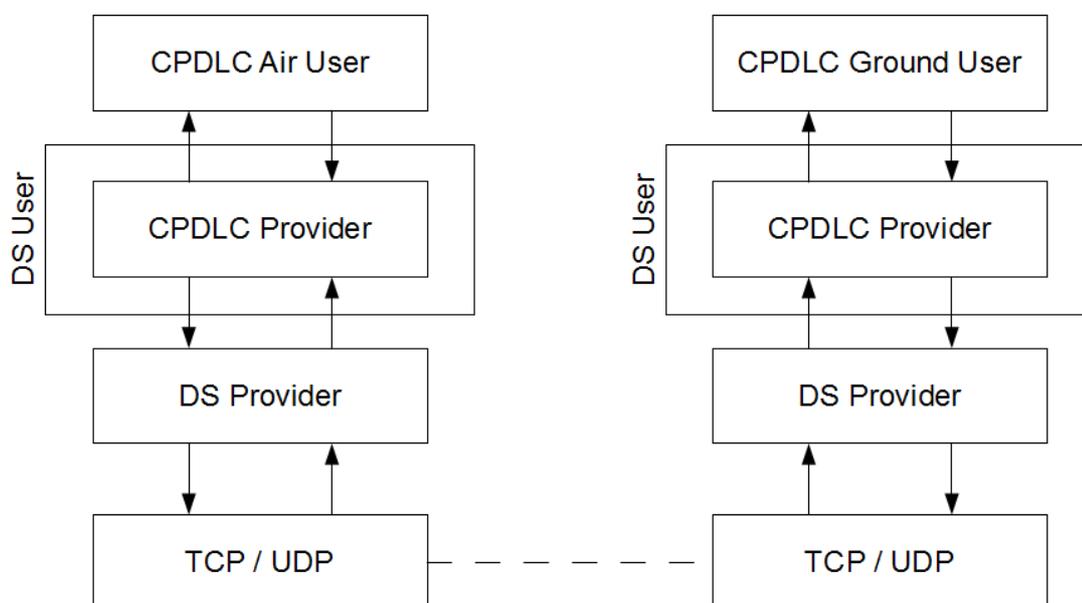


Figura 15 - Subcamadas do CPDLC.

O controlador utiliza uma aplicação (de usuário) do tipo CPDLC *Ground User*, enquanto a aeronave utiliza uma do tipo CPDLC *Air User*. As aplicações possuem pequenas diferenças no conjunto de mensagens possíveis de serem enviadas e no seu funcionamento interno. Por exemplo, o CPDLC *Ground User* pode enviar ordens de alteração de proa, enquanto que o CPDLC *Air User* só pode enviar solicitações de alteração de proa, devendo ser aprovada pelo controlador.

2.3.4.1 Primitivas de Comunicação

Assim como o DS, o CPDLC também possui primitivas de comunicação para permitir que dois CPDLC *Users* troquem informações entre si. Dentre as primitivas, existem os tipos: *CPDLC-start*, *DSC-Start*, *CPDLC-message*, *CPDLC-end*, *DSC-end*, *CPDLC-forward*, *CPDLC-user-abort*, *CPDLC-provider-abort*. De forma análoga ao DS, estas primitivas permitem que as aplicações CPDLC troquem informação entre si. Do mesmo modo, existem para cada tipo existem as primitivas Req, Ind, Rsp e Cnf.

As primitivas DSC-* são utilizadas para trocas de mensagens sem confirmação de recebimento. Que podem ser utilizadas durante situações de emergência para envio rápido de mensagens. A primitiva *CPDLC-start* inicia a conexão, enquanto a *CPDLC-end* o finaliza. A primitiva *CPDLC-message* envia as mensagens propriamente ditas. Caso ocorram problemas nas camadas inferiores da ATN, as primitivas *CPDLC-user-abort* e *CPDLC-provider-abort* encerram a conexão unilateralmente.

2.3.4.2 Diagrama de Estados e de Tempo

O CPDLC Service é um serviço orientado à conexão. Assim, para o estabelecimento de uma conexão. Ocorre o seguinte processo:

O piloto, utilizando o CPDLC *Air User*, solicita uma conexão com um determinado controlador, por meio da primitiva *CPDLC-start-Req*. A camada CPDLC *Provider* mapeia esta requisição em uma primitiva *D-START-REQ*, que é transmitida pelo CPDLC (*Service*) *Provider*, gerando um *D-START-IND* no outro extremo. Este é, por sua vez, mapeado na primitiva *CPDLC-Start-Ind* que é recebida pela aplicação do controlador, a CPDLC *Ground User*.

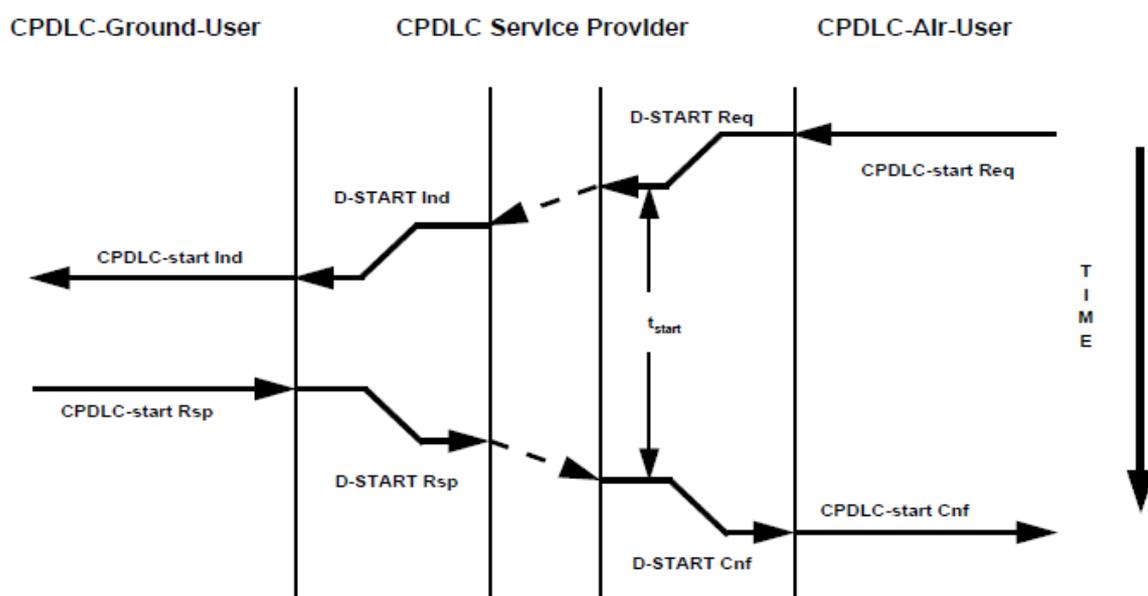


Figura 16 - Diagrama de tempo de estabelecimento de conexão CPDLC. Fonte: (ICAO, 2009)

Com a aceitação da conexão por parte do controlador, ocorre o processo inverso, formado pelas primitivas *CPDLC-Start-Rsp* e *CPDLC-Start-Cnf*. A Figura 16 apresenta o diagrama de tempo do início de uma conexão. Pode ser observado que o tempo máximo de conexão é contabilizado a partir do envio do D-START-REQ na camada de transporte da ATN até o recebimento da confirmação. No CPDLC, este tempo é de, no máximo, 6 minutos.

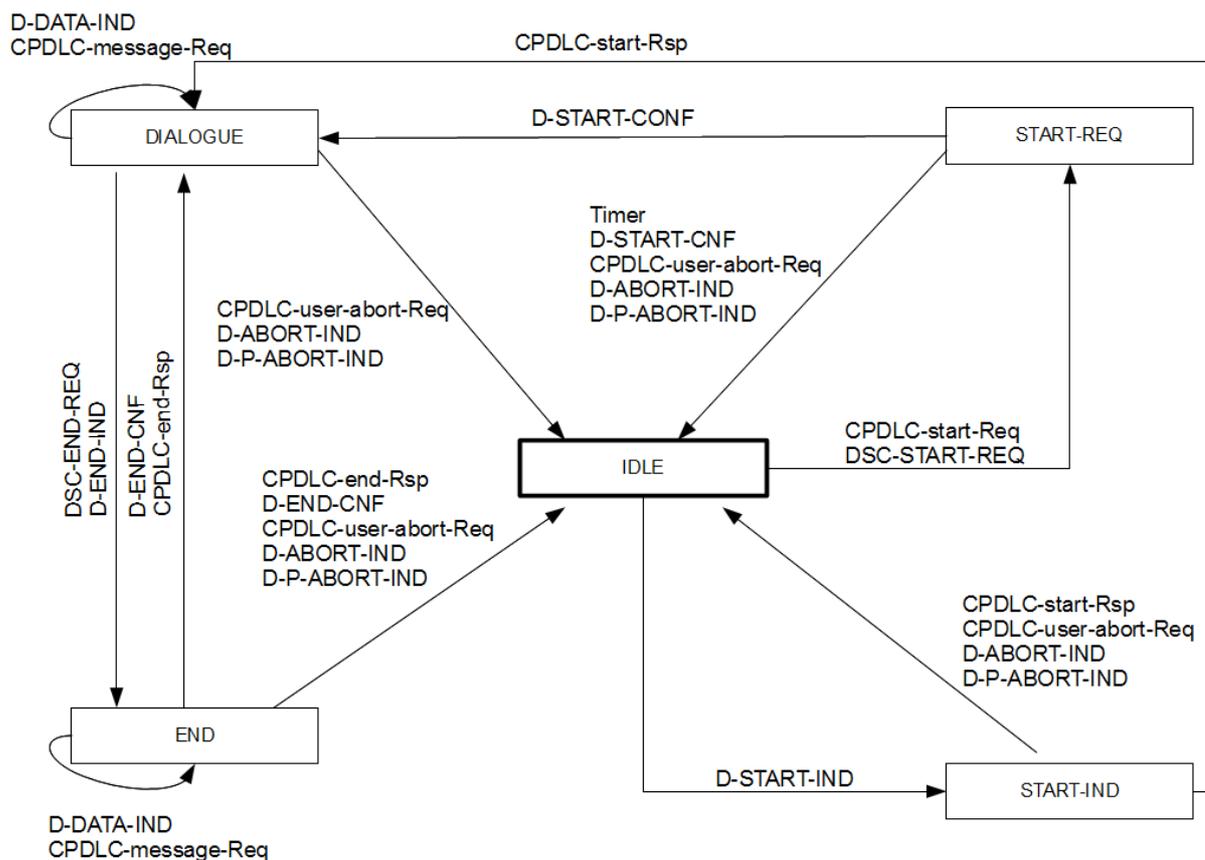


Figura 17 - Diagrama de estados do CPDLC. (Fonte: autor).

Observando-se o diagrama de estados do piloto, na Figura 17, o qual inicia-se com o estado inicial sendo IDLE. Pode-se ver que o respectivo CPDLC *Provider* transita para o estado START-REQ ao receber uma primitiva CPDLC-*Start-Req* da aplicação. Após receber a confirmação do controlador, D-START-CNF, a máquina de estados transita para o estado DIALOGUE. No estado DIALOGUE, as duas aplicações CPDLC podem enfim trocar informações entre si.

2.3.4.3 Formato de Mensagens

O pacote de dados CPDLC é composto de inúmeros objetos e campos, formando uma complexa estrutura em árvore. As mensagens possíveis de serem enviadas refletem o vocabulário padrão de mensagens entre pilotos e controladores praticado na comunicação analógica.

As mensagens do CPDLC estão definidas em linguagem ASN.1 (ICAO, 2009). A linguagem ASN.1 é uma linguagem que permite expressar uma estrutura de objetos de forma abstrata, sem depender de implementações. Esta padronização permite que apenas mensagens válidas sejam enviadas, evitando assim erros de entendimento.

A estrutura de objetos representando uma mensagem do controlador, ou do piloto, é codificada utilizando-se o *Packet Encoding Rules* (PER) não alinhado. Esta codificação transforma a árvore de objetos ASN.1 da mensagem em um bloco contínuo de *bytes* que pode ser enviado pela camada DS.

```

-----
-- Aircraft Generated Messages - Top level
-----
AircraftPDUs ::= CHOICE
{
    abortUser [0] CPDLCUserAbortReason,
    abortProvider [1] CPDLCProviderAbortReason,
    startdown [2] StartDownMessage,
    send [3] ICDownlinkMessage,
    ...
}

```

Figura 18 - Trecho do código ASN.1 do CPDLC.

A Figura 18 apresenta o código do objeto de mais alto nível que compõe uma mensagem do CPDLC *Air User*, um *AircraftPDU*. No código, pode-se ver que o *AircraftPDU* é formado por um dos outros objetos: *CPDLCUserAbortReason*, *CPDLCProviderAbortReason*, *StartDownMessage* ou *ICDownlinkMessage*. Os três primeiros representam mensagens de controle do protocolo, enquanto o último representa uma mensagem de dados do piloto.

2.3.5 Aplicações CPDLC User

A utilização do CPDLC se dá por meio de duas interfaces Humano-Computador (IHC) distintas. No solo, o controlador de tráfego utiliza uma interface que poderá ser integrada no console radar. No ar, o piloto utiliza o CPDLC por meio do computador

de bordo da aeronave. Para a realização desta pesquisa, foram implementados dois protótipos destas interfaces, descritos no Capítulo 4.

No caso do controlador, este utiliza a aplicação CPDLC *Ground User*, integrada ao seu console radar, apresentada na Figura 19. Nesta figura, pode-se ver o operador selecionando o menu de desvios laterais (*CONT HDG*, *FLY HDGm DCT TO*, *TURN LEFT*, *TURN RIGHT*, etc).



Figura 19 - Interface CPDLC do controlador.
Fonte: <<http://tube.7s-b.com/profile/musicalaviator/>>

A Figura 20 apresenta a interface do piloto, que executa a aplicação *CPDLC Air User*. Na figura está retratada o sistema com a conexão já estabelecida, indicada por “ATC COMM ESTABLISHED”. O piloto já utiliza esta interface para programação do computador de bordo, de forma que o CPDLC é executado como mais uma opção no menu.



Figura 20 - Interface CPDLC do piloto.

Fonte: <<http://members.optusnet.com.au/~cjr/CPDLC.htm>>

As figuras apresentadas retratam exemplos de implementações CPDLC. Como a OACI não define uma padronização para as interfaces, esta fica a cargo dos fabricantes e das autoridades aeronáuticas.

2.4 REQUISITOS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL

Segundo o (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2009b), o serviço de tráfego aéreo necessita de uma comunicação bilateral contínua, sendo em ambas as direções e sem interrupções. Também devem ser observadas algumas restrições temporais tais como a precisão de 1 segundo no registro de tempo das mensagens (*timestamp*) e a capacidade de atender 1250 aeronaves simultaneamente.

Para a comunicação digital, a OACI estabeleceu tempos máximos de atraso na entrega das mensagens. Este tempo é consumido no trânsito entre os equipamentos que compõem a rede aeronáutica e na espera para a utilização do *data link* (ICAO,

1999). Estes tempos máximos são descritos na forma de classes de desempenho da rede.

A classes ATSC são a especificação da OACI para o desempenho da rede. Para cada classe existe um atraso máximo que uma mensagem pode levar para ser transmitida por uma aplicação na ATN. Aqui contabiliza-se o tempo fim-a-fim da mensagem. A Tabela 3 mostra esses tempos máximos para 95% das transmissões.

Tabela 3 - Tempos de atraso para classes ATSC.

Máximo Atraso de trânsito unidirecional fim-a-fim na ATN com probabilidade de 95% (segundos)	Classe ATSC
Reservado	A
4.5	B
7.2	C
13.5	D
18.0	E
27.0	F
50.0	G
100.0	H
Sem valor especificado	Sem preferência

Para o caso da classe C, está indicado 7,2 segundos. Isto significa que 95% das mensagens transmitidas por uma rede classe C deve chegar em até 7,2s. Além disso, o tempo máximo gasto na camada de transporte não pode exceder 90% do tempo total da transação. Dessa forma, na classe C, para 95% das mensagens, o tempo gasto entre o controlador apertar o botão de envio e a mensagem ser recebida pelo piloto deve ser menor que 8 segundos.

Baseado nisso, a FAA estabelece atrasos para as mensagens do CPDLC no espaço aéreo dos Estados Unidos (FAA, 1998a). A Tabela 4, apresenta os atrasos médio, para 95% e para 99,996% das mensagens para as duas fases principais do voo. Nota-se que, para aeronaves que estão em Áreas Terminais próximas aos aeródromos, os tempos são menores, pelo fato dessas estarem mais próximas e em

maior quantidade. A precisão do *timestamp* é obtida através de relógios internos sincronizados com os sinais do GPS. A definição da FAA aloca a rede C para Área Terminal e a rede D para voo em rota.

Tabela 4 - Tempos segundo a FAA

Domínio	Atraso Fim-a-fim (total)			Classe ATSC
	Médio	95%	99,996%	
Terminal	5s	8s	12.5s	C
Em rota	10s	15s	22s	D

Fonte: (FAA, 1998a)

Estas características de desempenho podem ser modeladas segundo uma distribuição Normal Truncada dos tempos de entrega. Utiliza-se a distribuição Normal Truncada pois não é possível que mensagens sejam entreguem em tempo negativo.

Assim, pode-se definir as distribuições que representam as classes ATSC da OACI. Na Tabela 5 estão apresentadas as classes ATSC. Para cada classe foram calculados os parâmetros da distribuição Normal Truncada e feita a verificação calculando-se a probabilidade acumulada do atraso X , para confirmar que esta é exatamente 95%.

Tabela 5 - Parâmetros da distribuição Normal Truncada para as classes ATSC.

Classe ATSC	Atraso para 95% das mensagens (X)	Normal Truncada		Probabilidade Acumulada para X
		Média	Desvio Padrão	
B	4,5	2,9	1,3	95,00%
C	7,2	5,0	1,8	95,00%
D	13,5	10,0	3,0	95,00%
E	18,0	14,2	3,6	95,00%
F	27,0	22,5	4,6	95,00%
G	50,0	44,0	7,0	95,00%
H	100,0	92,6	11,3	95,00%

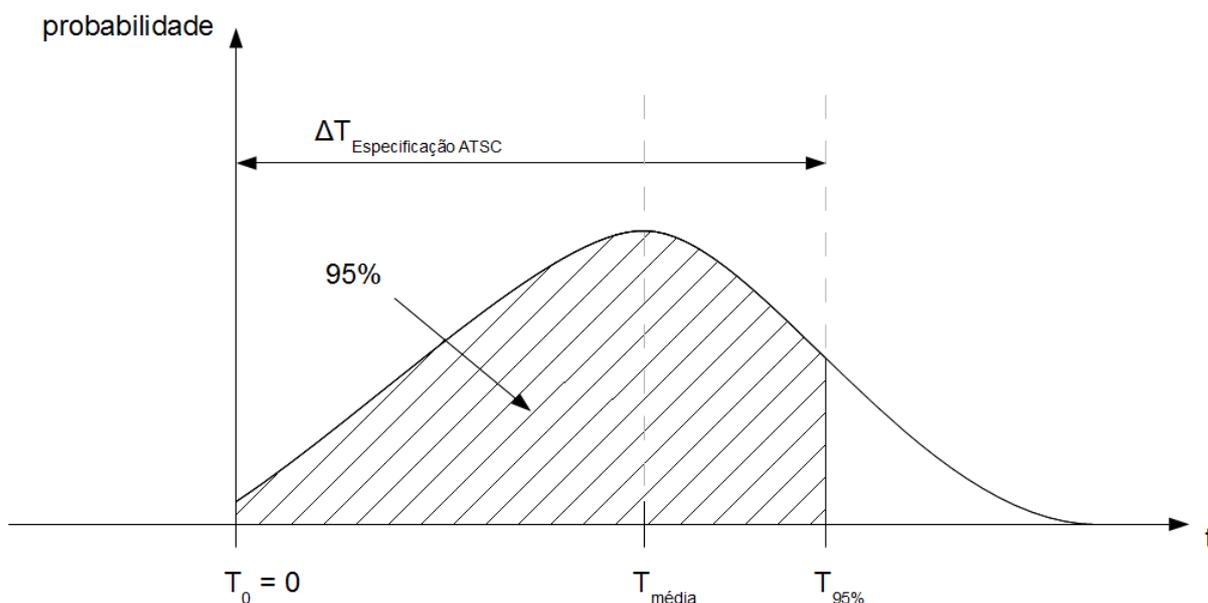


Figura 21 - Atraso da mensagem na distribuição Normal Truncada.

A Figura 21 apresenta a função densidade de probabilidade da distribuição Normal Truncada, na qual pode-se ver que o $\Delta T_{Especificac\~{a}o\ ATSC}$, representando o valor especificado na classe ATSC, representa 95% das mensagens enviadas seguindo esta distribuição.

2.5 COMUNICAÇÃO ANALÓGICA VERSUS DIGITAL

Muito se discute sobre a implantação da comunicação digital no ambiente aeronáutico. Apesar do CPDLC já estar sendo padronizado na OACI, usuários e autoridades questionam a sua eficácia (COPPENBARGER ET AL., 2001).

Apesar de ser a tecnologia atual, a comunicação analógica possui diversos problemas. Usualmente a comunicação sofre interferências de rádios-pirata, principalmente nas grandes cidades. As interferências podem ocasionar perda temporária da comunicação e até mal-entendidos. Outro problema desse tipo de comunicação é a saturação do canal, uma vez que a transmissão de uma mensagem bloqueia muito tempo o enlace. Além disso, a má compreensão do idioma Inglês para não nativos também acarreta problemas de entendimento.

A comunicação digital por enlace de dados resolve quase a totalidade dos problemas de interferência, uma vez que a mensagem é transmitida em formato digital, com verificação de erro e dispositivos de segurança (*security*).

Por outro lado, a confirmação de recebimento de uma mensagem na comunicação analógica é praticamente instantânea, enquanto a digital depende do tráfego da ATN, que é não-determinístico na maioria dos casos, não se podendo prever com exatidão quanto tempo levará para a mensagem chegar ao seu destino.

Outra diferença entre os dois tipos é quanto ao recebimento de mensagens incompletas ou incorretas. Na comunicação analógica, se a mensagem não for recebida de forma completa, a outra parte consegue perceber e pedir para que seja repetida. No caso da comunicação digital, o próprio sistema percebe que a mensagem chegou errada e pede a retransmissão para a outra parte. Ou seja, na comunicação digital só existe duas possibilidades: a mensagem chega completa ou não chega. Já na analógica existe a possibilidade da mensagem chegar truncada com informações faltantes ou mesmo incorretas.

Quanto ao problema do idioma existente na comunicação por voz, este pode ser resolvido na comunicação digital com a tradução automática da mensagem digital para o idioma nativo do piloto ou controlador pela aplicação.

Do ponto de vista da ocupação do canal, a comunicação por enlace digital de dados ocupa muito menos espaço do que a analógica, permitindo um aumento na capacidade do espaço aéreo com mais aeronaves se comunicando no mesmo intervalo de tempo.

Outro ponto de discussão é a utilização de mensagens de texto, no caso digital, pois estas sobrecarregariam o sentido visual dos pilotos. Hoje a função de comunicação é feita pela fala e audição, ficando a visão apenas para navegação e pilotagem. Este problema pode ser contornado com o uso de sintetizadores e reconhecedores de voz.

Dessa forma, a comunicação digital mostra-se viável de ser implementada, pois, do ponto de vista funcional, apresenta características equivalentes e até melhores do que a comunicação por voz. Porém, a característica de desempenho ainda é uma incógnita para a comunicação digital, onde o senso comum nos leva a acreditar que é uma rede menos confiável. Em face disso, esta pesquisa avalia o desempenho das redes digitais em um cenário de Área Terminal, por meio da metodologia desenvolvida e apresentada no Capítulo 5.

3 SIMULADORES AERONÁUTICOS

Existem diferentes tipos de simuladores aeronáuticos, com finalidades diversas como entretenimento ou pesquisa científica. Este capítulo apresenta as principais características dos simuladores aeronáuticos existentes e algumas das implementações estudadas. Por fim, é feita uma comparação entre estas diante das suas principais características.

3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Os simuladores aeronáuticos podem ser estudados segundo algumas de suas características. Nesta pesquisa serão apresentadas as características com relação ao sistema modelado, à abrangência da simulação, à temporização do relógio, ao tipo de evento simulado e à interatividade.

3.1.1 Sistema Modelado

A principal diferença entre os simuladores é o sistema que pretendem modelar. Os dois principais tipos são os simuladores de voo e os de tráfego aéreo.

Os **simuladores de voo** estão focados na simulação da física de uma aeronave e dos seus sistemas internos. Usualmente apresentam uma interface gráfica com o ponto de vista do piloto na cabine de comando, apresentando o painel de instrumentos e permitindo a condução da aeronave.

Estes simuladores são usados para treinamento de pilotos em novas aeronaves ou em novos procedimentos, para prática de situações emergenciais, para desenvolvimento de aeronaves e testes de novos equipamentos embarcados.

Recentemente, estes simuladores vêm sendo usados para pesquisas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) (GIL ET AL., 2010).

Os **simuladores de tráfego aéreo**, por outro lado, têm como objetivo simular o espaço aéreo como um todo e não apenas uma aeronave. O foco destes simuladores é em uma região do espaço aéreo e na interação entre as aeronaves. Por isso, a representação da aeronave é simplificada. Em alguns casos há uma interface para um controlado de tráfego aéreo interagir como se estivesse recebendo informações do radar.

Com um amplo uso por parte das autoridades aeronáuticas, os simuladores de tráfego aéreo oferecem subsídios para o planejamento do espaço aéreo. Permitindo que sejam previstas demandas e gargalos do sistema antes que estes aconteçam. Uma outra função é o treinamento de controladores em novos procedimentos.

3.1.2 Abrangência da Simulação

Do ponto de vista aeroportuário, pode-se separar as funções de um aeroporto nos chamado lado aéreo (*air-side*) e lado terrestre (*ground-side*) (BASTOS ET AL., 2008). Da mesma forma, pode-se classificar os simuladores quanto à abrangência de cada um destes aspectos na simulação.

O **lado aéreo** (*air-side*) é composto pelo espaço aéreo em si, e também pelas áreas nas quais uma aeronave transita dentro do aeroporto, tais como pistas de pouso e taxiamento, boxes de estacionamento ou manutenção. Deste lado, são modelados os movimentos das aeronaves, filas de espera em terra ou no ar, dinâmica de voo, entre outros. Também são considerados os procedimentos de navegação e a interação entre aeronaves.

A outra parte representada é o **lado terrestre** (*ground-side*). Esta abrange as áreas de um aeroporto nas quais aeronaves não transitam. Por exemplo, pode-se citar

balcões de *check-in*, esteiras de bagagem, terminais de passageiros e cargas, saguões de espera, etc. O foco do lado terrestre é estudar gargalos internos à um aeroporto. A utilização de um simulador com abrangência nas duas áreas é interessante para se avaliar o impacto de alterações em um lado no outro.

3.1.3 Temporização do Relógio

A característica de temporização do relógio diferencia os simuladores entre tempo real (*real-time*) e tempo acelerado (*fast-time*).

Em uma simulação de **tempo real** (*real-time*), o tempo transcorre na simulação com a mesma velocidade que no mundo real (BURNS; WELLINGS, 2009). O tempo de processamento de um instante da simulação precisa ser menor do que o tempo exterior. Pois caso esta propriedade seja violada, ocorre atrasos na simulação e sua não correspondência com o real.

Este tipo de simulação é útil para exibir situações gravadas, obter mais informações para uma investigação de incidente ou para treinamento (ALLERTON, 2009). Além disso, a simulação em tempo real pode interagir com sistemas físicos reais, possibilitando a sua análise em situações mais complexas ou não executáveis fisicamente.

Uma grande parte dos eventos relacionados à segurança (*safety*) do transporte aéreo é muito rara, sendo difícil de ser amostrada em tempo real (BROOKER, 2002). A simulação de **tempo acelerado** (*fast-time*) permite que sejam estudados novos cenários de operação e em uma quantidade maior do que a de tempo real, pois neste caso, o relógio da simulação avança a medida que os dados são processados, não sendo limitada ao tempo exterior (ALLERTON, 2009).

3.1.4 Tipo de Evento Simulado

Os eventos modelados no simulador podem ter uma característica discreta ou contínua (CHWIF; MEDINA, 2010). Para refletir isto, existem simuladores de eventos discretos e de eventos contínuos.

Eventos discretos são aqueles que ocorrem em um determinado instante de tempo e são analisados pontualmente. Por exemplo, a chegada de aeronaves à um aeroporto ou a recepção de uma mensagem é um evento discreto. Os simuladores de eventos discretos são utilizados para se calcular filas, taxas e atrasos nos sistemas modelados. Os simuladores deste tipo usualmente modelam os sistemas por meio de equações matriciais e distribuições de probabilidade.

Por outro lado, os **eventos contínuos** são aqueles que variam continuamente no tempo. Por exemplo, a altitude de uma aeronave varia ao longo do seu voo. Os simuladores de eventos contínuos utilizam equações diferenciáveis no tempo e as usam para calcular o valor das variáveis simuladas no decorrer da simulação. Vale ressaltar que um simulador pode combinar modelos discretos e contínuos, aumentando a flexibilidade da simulação.

3.1.5 Interatividade

Com relação à interatividade. Pode-se ter simuladores que permitam a interação de um operador humano ou não.

Um **simulador interativo** é aquele no qual os usuários podem executar ações que modificam o estado da simulação ao longo desta (MCCARTY ET AL., 1994). Dessa forma, é possível comandar aeronaves, trocar mensagens e disparar eventos “de fora” do simulador. Os simuladores utilizados em treinamentos normalmente são interativos.

A interatividade é importante para o estudo do comportamento de controladores e pilotos. Uma vez que a modelagem das reações humanas é difícil, a interatividade é usada para permitir que uma pessoa real faça o seu papel na simulação (DARBY, 1998). Porém, o uso de interatividade não permite a utilização de simulação de tempo acelerado, o que restringe o seu uso aos simuladores de tempo real.

Entretanto, os **simuladores não interativos** podem realizar simulações em tempo acelerado, pois não dependem de reações de operadores humanos. Sem a possibilidade de interação ao longo da simulação, os dados são colhidos ao final desta. Estes simuladores são muito utilizados em testes exaustivos de sistemas.

3.2 SIMULADORES ESTUDADOS

Nesta pesquisa foram estudados alguns simuladores aeronáuticos com o intuito de se analisar suas características, vantagens e desvantagens para o uso na metodologia proposta nesta pesquisa.

3.2.1 *Flight Simulator X (FSX)*

O *Flight Simulator X* é um simulador de voo interativo desenvolvido pela Microsoft (MICROSOFT, 2006) sendo muito popular dentre os utilizados para treinamentos básicos. Por ser de tempo real e interativo, seu uso principal é para entretenimento. Porém, como modela com perfeição o funcionamento de diversas aeronaves, já foi utilizado em pesquisas (CAASD, 2008). O modelo físico da aeronave utiliza a partir de modelos básicos, parâmetros para a sua definição tais como da envergadura, massa, centro de gravidade, empuxo dos motores, etc. A Figura 22 exhibe uma tela do FSX.

Outra vantagem deste simulador é a sua interface de programação. Esta permite o total controle das variáveis da simulação, de forma que módulos adicionais podem

ser desenvolvidos e os dados de voo capturados. Nesta pesquisa foi utilizado este simulador para a geração dos dados das trajetórias das aeronaves por meio do módulo *FSX Recorder*, descrito no Capítulo 4.



Figura 22 - *Microsoft Flight Simulator X*.

3.2.2 X-Plane

O simulador *X-Plane*, ilustrado na Figura 23, foi desenvolvido pela *Laminar Research* (LAMINAR RESEARCH, 2007) sendo similar ao FSX. É utilizado para aplicações de entretenimento, treinamento de pilotos e pesquisas. Sua principal característica é simular a física da aeronave a partir da técnica de modelagem por elementos finitos, fazendo deste simulador a principal escolha de projetistas de aeronaves.

Atualmente certificado para treinamentos pela FAA, o *X-Plane* pode ser utilizado para contabilização de horas de voo em simuladores para a obtenção da licença de

pilotagem nos Estados Unidos. Entretanto, a interface de programação deste simulador é complexa e há pouca documentação publicada.



Figura 23 - X-Plane.

3.2.3 Flight Gear

Na Figura 24 é mostrado o *Flight Gear*. Este simulador de voo é similar ao FSX e ao *X-Plane*, sendo também interativo e focado no ponto de vista do piloto. A principal vantagem deste simulador é possuir código-fonte aberto e disponível gratuitamente para uso (MURR, 1996). Por causa desta flexibilidade, o *Flight Gear* é utilizado para inúmeras pesquisas aeronáuticas, existindo muitos estudos baseados neste simulador.

O modelo físico de aeronave pode ser escolhido dentre duas opções: YASim e JSBSim, sendo esta última mais utilizada. Ambas utilizam equações paramétricas para calcular as variáveis de voo.



Figura 24 - *Flight Gear*.

3.2.4 JSBSim

O JSBSim é uma das bibliotecas de descrição de modelo físico utilizadas no *Flight Gear*. Além disso, é também um simulador de voo de código aberto (JACOBS, 2004). Podendo ser utilizado em tempo real e em tempo acelerado (JACOBS, 2009). A sua interface de programação é simplificada, facilitando a sua integração em outros simuladores. No caso da utilização em tempo acelerado, pode-se criar *scripts* para definir o comportamento da aeronave ao longo da simulação.

Por outro lado, por ser um simulador ainda em desenvolvimento, não há muitos modelos parametrizados. Além disso, para a utilização de sistemas de piloto automático, ainda se faz necessário um grande número de parametrizações, dificultando o seu uso. O JSBSim não possui uma interface gráfica.

3.2.5 IVAO

Um simulador de tráfego aéreo interativo é a *A International Virtual Aviation Organization* (IVAO) (IVAO, 2005). Uma rede formada por voluntários interessados em aviação, ela oferece um serviço baseado na internet que permite a interação de pilotos e controladores em um espaço aéreo simulado. O objetivo deste simulador é tornar mais realista a experiência de voo simulado. Esta experiência é alcançada unindo-se, através da internet, diversos pilotos e controladores de tráfego aéreo.

No espaço aéreo simulado, os pilotos conectam à rede utilizando simuladores de voo como o FSX ou o X-Plane, enquanto que os controladores utilizam interfaces próprias, similares ao console radar (IVAO, 2005). Por combinar características dos simuladores de voo com o controle de tráfego aéreo, este simulador modela eventos discretos e contínuos.

Apesar de ser voltado para entretenimento, a sua principal característica é a interação entre os pilotos e controladores, seguindo os procedimentos reais de tráfego aéreo. Ou seja, para realizar um voo, um piloto deve se conectar a rede e enviar o seu plano de voo. Este plano de voo deve ser aprovado por um órgão ATC que, no caso, será o órgão de origem do voo (caso disponível).

Assim, antes de decolar, o piloto entra em contato com o ATCo responsável pelas primeiras fases de seu voo e solicita as instruções necessárias ao voo controlado. Este controlador, e os subsequentes em sua região de voo, assumem a responsabilidade sobre a aeronave desde o seu aeródromo de origem até o seu destino. Assim, os controladores transferem a aeronave ao órgão ATC adjacente sempre que necessário. Tanto os pilotos quando os controladores utilizam interfaces específicas.

A Figura 25 apresenta a interface do controlador. Esta interface é similar ao console radar utilizado pelos controladores reais. Na figura pode-se observar do lado direito

uma visão do aeroporto de Congonhas. Nas janelas à esquerda aparecem informações referentes aos voos sob responsabilidade do controlador. A janela COMMBox é utilizada para comunicação textual com os pilotos, porém sem a padronização definida pela OACI.

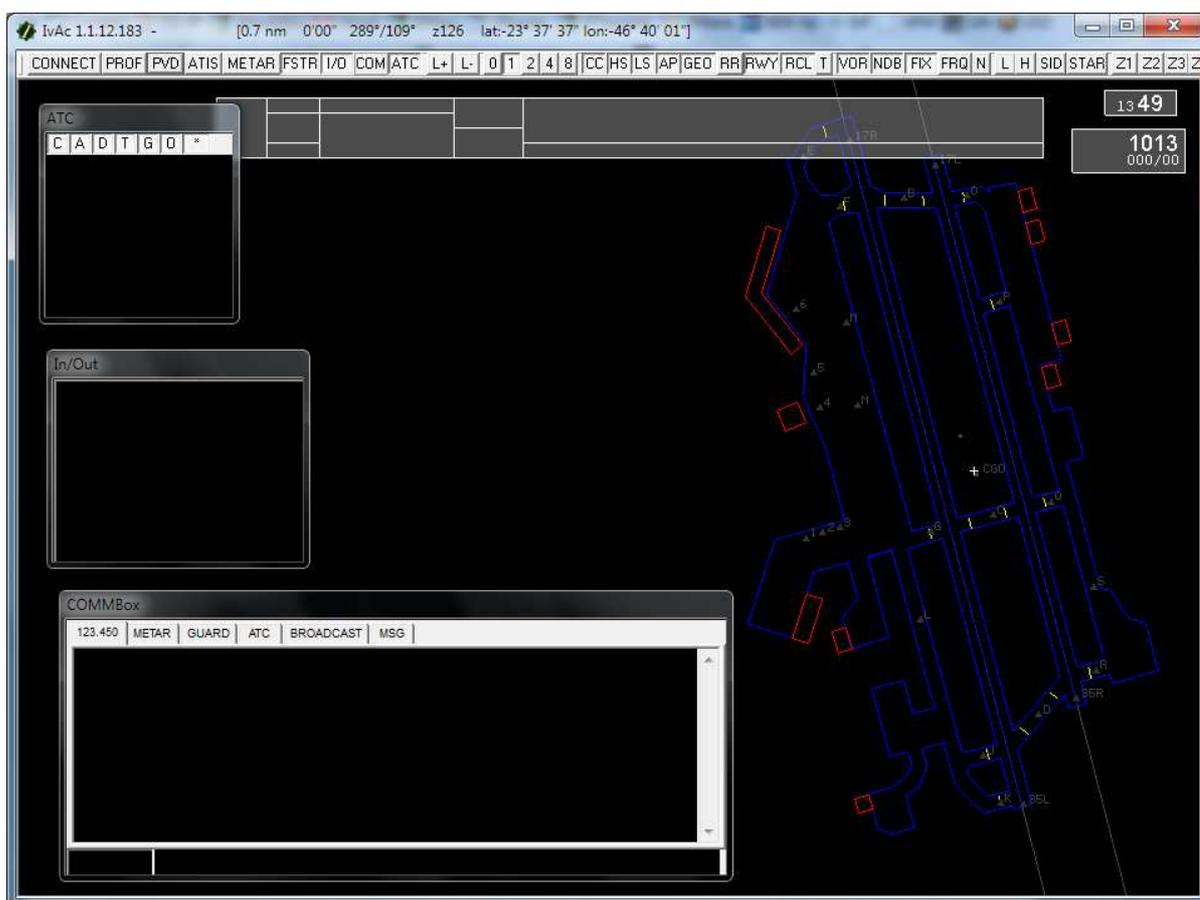


Figura 25 - Interface do controlador na IVAO.

Por sua vez, o piloto utiliza uma interface, apresentada na Figura 26, que se integra ao simulador de voo. Esta interface não existe em aeronaves reais nem é prevista no CNS/ATM. Porém ela foi criada devido às particularidades de conexão com a rede.

Na figura, pode-se ver um *display* para a exibição das informações da rede, e botões de acesso a funções indicadas no *display*., por exemplo a sintonização da frequência 122.8 apertando-se o botão esquerdo superior. Nesta interface, pode-se ainda acionar a janela de comunicação para trocar informações não padronizadas com o controlador.



Figura 26 - IvAp.

3.2.6 VATSIM

A VATSIM é uma rede de simulação similar à IVAO, porém administrada por outro grupo de voluntários (VATSIM, 2001). Ela possui os mesmos tipos de interfaces e características do simulador apresentado anteriormente.

Uma vantagem desta rede, é a sua validação, por parte do centro de pesquisas americano *Center for advanced Aviation System Development* (CAASD), em experimento científicos. Um dos procedimento realizados foi a alteração de um procedimento de aproximação para que fossem estudadas as implicações e facilidades de aprendizado das novas informações. Pilotos e controladores receberam a descrição do novo experimento e o executaram. Um dos resultados obtidos foi a dificuldade dos pilotos em realizar uma das curvas do procedimento de forma correta. Isto foi posteriormente verificado quando se realizou o mesmo experimento com aeronaves reais (CAASD, 2008).

3.2.7 RAMS

O *Reorganized ATC Mathematical Simulator* (RAMS) é um simulador desenvolvido pela ISA Software e utilizado pela *Eurocontrol* (ASKOVIC, 2002). O RAMS é vendido comercialmente, porém é gratuito para uso em universidades. As Figuras 27 e 28 apresentam telas do simulador.

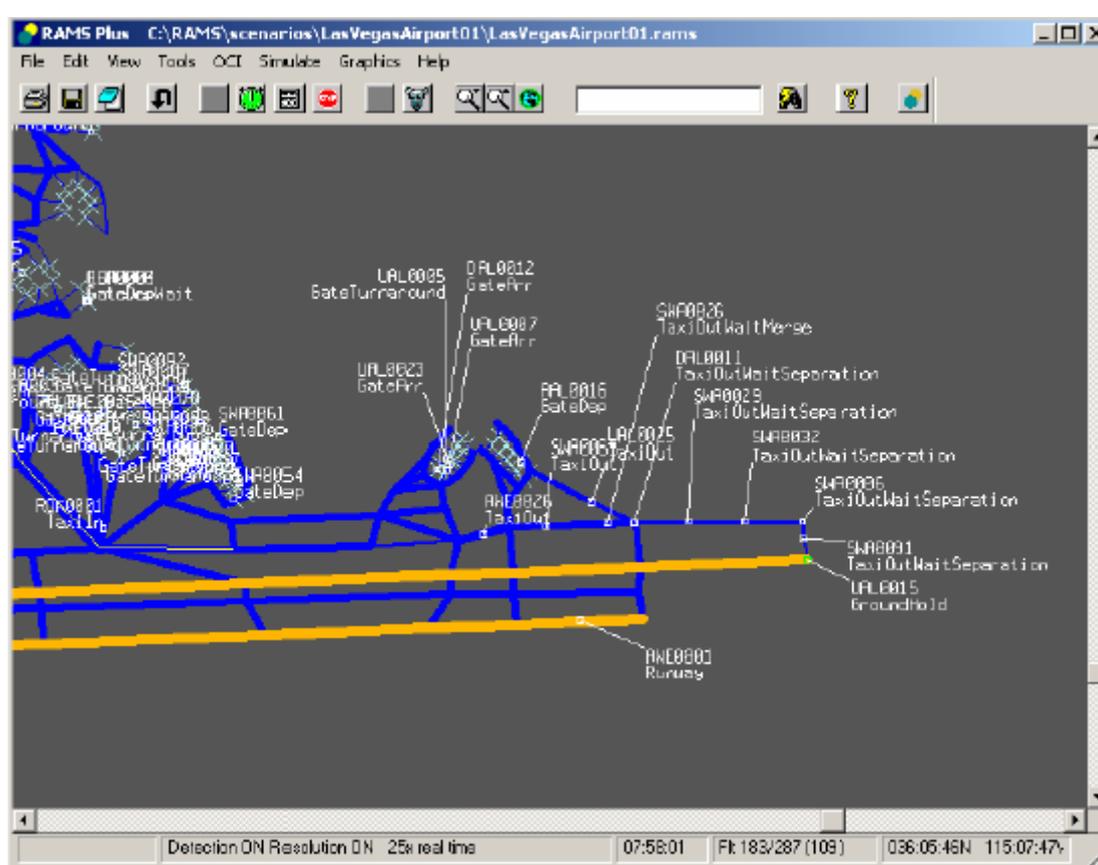


Figura 27 - RAMS - Visão do aeroporto.

Na Figura 27, pode-se observar a visão de um aeroporto, com a indicação de todas as aeronaves em solo. Na Figura 28, observa-se uma região mais ampla, abrangendo um setor de controle do espaço aéreo da mesma simulação.



Figura 28 - RAMS - Visão do setor de controle.

Este simulador inicialmente representava somente o lado aéreo, mas nas versões recentes também simula o lado terrestre, tanto de forma integrada quanto individual. O RAMS simula tráfegos nos regimes *free flight* e RVSM (*Reduced Vertical Separation Minimum*), novos regimes que reduzem a separação entre as aeronaves no CNS/ATM.

Outra característica relevante é a geração de tráfego estocástico, inserindo atrasos aleatórios nas operações das aeronaves. O RAMS permite a utilização de grades horárias de voos reais. Além disso, tomando como base uma grade horária, este simulador é capaz de gerar cenários de maior demanda, seguindo as mesmas características da grade de referência. Dessa forma, facilitando assim o estudo de crescimento do tráfego ao longo do tempo, não estando restrito somente aos dados de entrada.

3.2.8 TAAM

O *Total Airspace and Airport Modeller* (TAAM) é utilizado em larga escala por empresas do setor aeronáutico. Foi desenvolvido originalmente pela Preston, uma empresa que foi adquirida pela Boeing (JEPPESEN, 2010). A Figura 29 apresenta uma tela do simulador com uma visualização de um aeroporto modelado em 3D (BAZARGAN ET AL., 2002).

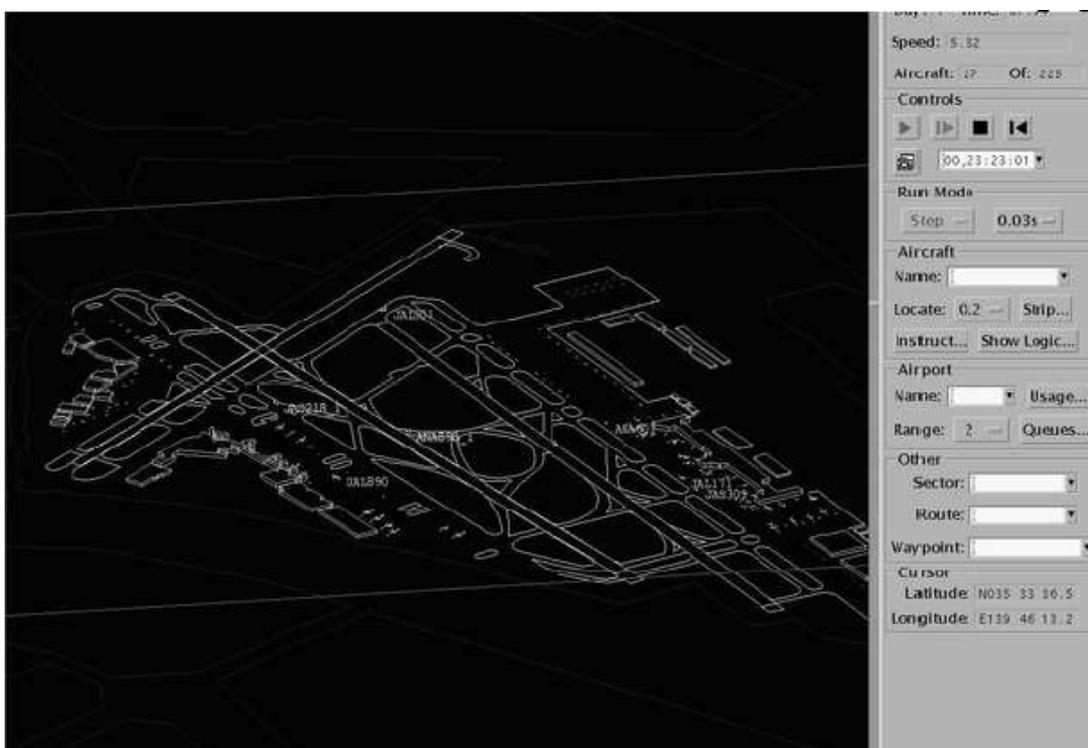


Figura 29 - TAAM - Visão geral.

Este simulador calcula a trajetória precisa de uma aeronave nas 4 dimensões (3 espaciais e o tempo), simulando curvas com suavidade e dentro dos limites das aeronaves. Outras características importantes dele é a modelagem de regras RVSM, condições meteorológicas, propagação de ruído e uma interface gráfica 3D.

O TAAM também possui um grande banco de dados de aeronaves, permitindo que sejam simulados espaços aéreos com uma grande variabilidade e proximidade com

o real. Por se tratar de um simulador de espaço aéreo, este não possui possibilidade de interação ou de visualização do ponto de vista do piloto.

3.2.9 SIMMOD Plus!

O *Airport and Airspace Simulation Model* (SIMMOD) foi desenvolvido pela ATAC (ASKOVIC, 2002). Sua principal característica é ser um simulador de tráfego aéreo utilizado e certificado pela FAA. Apesar do simulador ser gratuito, existe um conjunto pago de aplicações de apoio para utilização dele, que é conhecido por SIMMOD Plus!. A Figura 30 apresenta a tela de edição do espaço aéreo do SIMMOD Plus!.

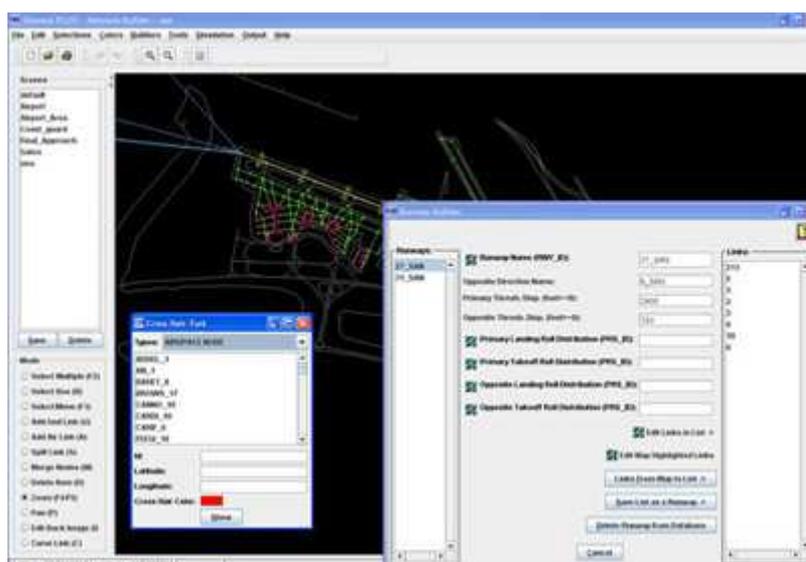


Figura 30 - SIMMOD Plus! - Visão geral.

Nesta figura, pode-se observar a visualização de um aeroporto. O SIMMOD utiliza parametrizações simplificadas para a configuração de um experimento, tornando simples a execução de estudos que exijam apenas uma visão macroscópica do sistema de tráfego aéreo.

3.3 RESUMO COMPARATIVO

Na Tabela 6, é mostrado um resumo das características de todos os simuladores apresentados neste capítulo.

Tabela 6 - Características dos simuladores.

Simulador	Características				
	Sistema	Abrangência	Relógio	Eventos	Interatividade
<i>FSX</i>	Voo	Aéreo	Tempo Real	Contínuos	Interativo
X-Plane	Voo	Aéreo	Tempo Real	Contínuos	Interativo
<i>Flight Gear</i>	Voo	Aéreo	Tempo Real	Contínuos	Interativo
JSBSim	Voo	Aéreo	Tempo Real e Acelerado	Contínuos	Interativo e Não Interativo
IVAO	Tráfego Aéreo	Aéreo	Tempo Real	Contínuos e Discretos	Interativo
VATSIM	Tráfego Aéreo	Aéreo	Tempo Real	Contínuos e Discretos	Interativo
RAMS	Tráfego Aéreo	Aéreo e Terrestre	Tempo Acelerado	Discretos	Não Interativo
TAAM	Tráfego Aéreo	Aéreo e Terrestre	Tempo Acelerado	Discretos	Não Interativo
SIMMOD Plus!	Tráfego Aéreo	Aéreo e Terrestre	Tempo Acelerado	Discretos	Não Interativo

Observando-se a tabela, nota-se que com relação ao sistema modelado, existem simuladores de voo e tráfego aéreo com as mais diversas características. No grupo de simuladores de voo, há uma predominância de simuladores interativos, pois como o objetivo da maior parte destes é simular a aeronave do ponto de vista do piloto, a interatividade é um atributo essencial. Por outro lado, os simuladores de tráfego aéreo tendem a ser de tempo acelerado, pois a maioria dos estudos foca-se em avaliação de demandas com diferentes configurações do espaço aéreo.

Com relação à abrangência, a totalidade dos simuladores modela o lado aéreo, sendo que apenas os simuladores de tráfego aéreo de tempo acelerado modelam o lado terrestre. Isto reflete uma grande preocupação pela operação das aeronaves, visando a segurança.

Com relação à temporização do relógio, existem simuladores de todos os tipos tanto de tempo real quanto acelerados. A escolha da temporização depende da natureza do experimento a ser realizado.

No âmbito da modelagem de eventos, ocorre o mesmo. Algumas partes do sistema de transporte aéreo são melhor modeladas utilizando-se eventos contínuos, tais como a dinâmica de voo, enquanto que o comportamento de controladores e troca de mensagens é modelada de forma discreta.

A interatividade está fortemente relacionada com a temporização do simulador. Os simuladores de tempo acelerado possuem uma característica não interativa, enquanto que os de tempo real permitem a interatividade.

Por fim, a escolha de um simulador de voo deve passar pelo estudo de suas características e a aderência destas à do experimento realizado. A disponibilidade de documentação e o acesso ao simulador também devem ser levados em consideração, uma vez que facilitam a integração de ferramentas e modelos adicionais.

4 SIMULADOR CPDLC

Para a realização desta pesquisa, foi desenvolvido um simulador CPDLC com o intuito de se entender o funcionamento deste tipo de comunicação e observá-la em operação. Este simulador foi desenvolvido e integrado à Pipe-SEC, uma plataforma que permite a integração de diversos simuladores aeronáuticos em um único ambiente. Neste capítulo é apresentada a arquitetura deste simulador e a sua integração à plataforma.

4.1 PIPE-SEC

A Plataforma Integrada para Ensaios de Sistemas Embarcados Críticos (Pipe-SEC) é um conjunto de hardware e software que integra diversos ambientes para teste e avaliação destes sistemas. O objetivo dessa plataforma é permitir o ensaio das novas tecnologias do CNS/ATM em um ambiente que represente a realidade do espaço aéreo, seja ele controlado ou não. Ela foi criada dentro do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos (INCT-SEC). Um dos módulos desenvolvido, nesta pesquisa, para essa plataforma é o simulador CPDLC que foi utilizado na realização de experimentos desse estudo de caso.

4.1.1 Modelo Conceitual

A Pipe-SEC possui dois ambientes (controlador e aeronave), integrados pelo servidor de espaço aéreo. O $ATCo_j$ representa o controlador enquanto o A_i representa cada aeronave. O servidor de espaço aéreo (*Airspace Server*), o gerenciador de experimento (*Experiment Management Kernel*) e o servidor de comunicação (*Communication Server*) permitem a troca de informações entre estas entidades, simulando o espaço aéreo real. A Figura 31 apresenta este modelo.

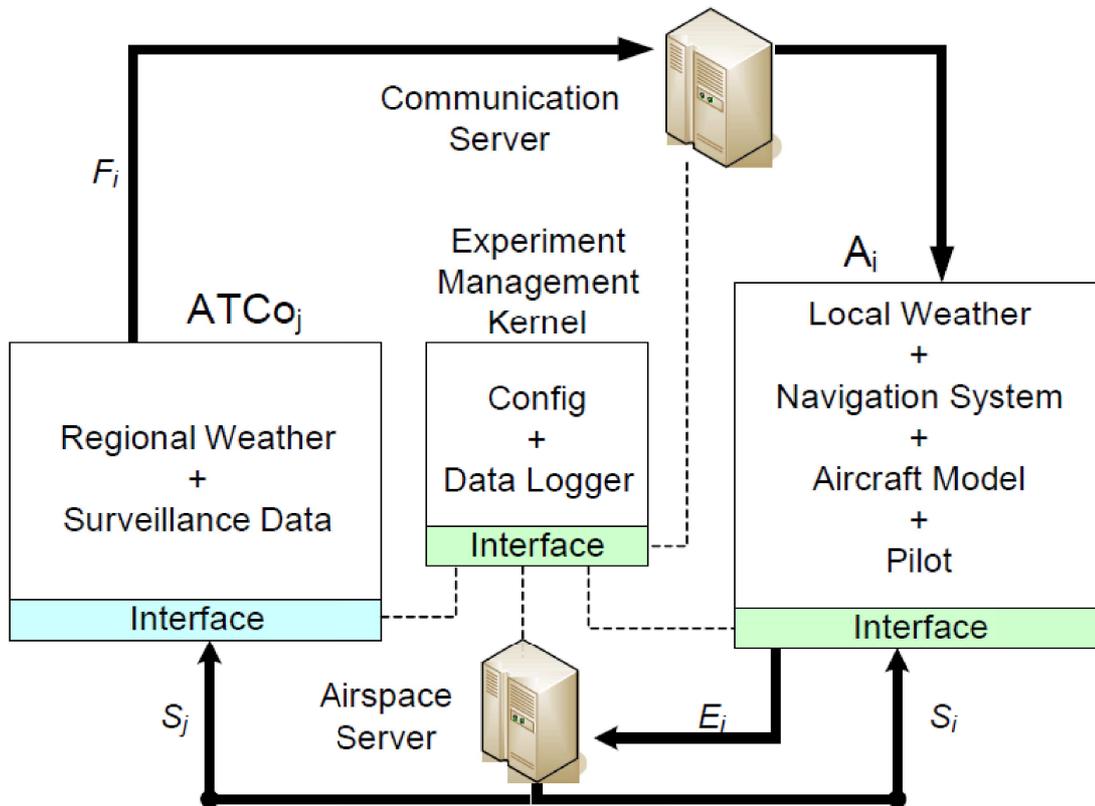


Figura 31 - Arquitetura da Pipe-SEC.

O módulo simulador de aeronave (A_i) pode ser modelado por simuladores de tempo real ou de tempo acelerado, permitindo ou não a interação de uma pessoa no papel de piloto (*Pilot*). Esta entidade também concentra as informações meteorológicas locais (*Local Weather*), os sistemas de navegação (*Navigation System*) e o modelo físico da aeronave.

O módulo controlador de tráfego aéreo ($ATCo_j$) permite a iteração de controladores de tráfego com as aeronaves. Este módulo apresenta as condições meteorológicas da região (*Regional Weather*) e de posicionamento das aeronaves (*Surveillance Data*) em uma interface gráfica que simula o console radar. Dessa forma, o serviço ATC pode ser realizado interativamente por pessoas no papel de controladores.

O Módulo servidor de espaço aéreo (*Airspace Server*) é responsável por simular o espaço aéreo, garantindo que todas as entidades estejam observando um mesmo contexto. Tal simulação é realizada recebendo as informações de estado de cada

aeronave da região (E_i), unificando-as e distribuindo o estado combinado (S_i) para os controladores e aeronaves que compartilham a região.

O módulo servidor de comunicação (*Communication Server*) permite a comunicação bilateral entre pilotos e controladores. O sistema de comunicação a ser simulado pode ser a comunicação por voz ou o CPDLC. Todas as mensagens trocadas são centralizadas neste módulo, de forma a permitir a medição de atrasos e a contagem de mensagens (F_i) trocadas em ambas as direções.

A simulação da comunicação analógica ocorre utilizando-se o servidor de comunicação e um cliente de voz sobre IP (VoIP) com característica *push-to-talk* (PTT). Dessa forma, a comunicação é iniciada quando uma das partes pressiona o botão de fala. O áudio é capturado e enviado ao servidor, que o redireciona para todos os usuários conectados no canal, simulando assim a comunicação analógica via rádio.

Já no caso da comunicação digital, a simulação é feita por meio do simulador CPDLC desenvolvido nesta pesquisa. Ele permite que sejam estabelecidas conexões entre aeronaves e órgãos ATC simulando a ATN. Assim, o piloto ou controlador seleciona a mensagem a ser enviada em um menu na sua interface correspondente e a mensagem é transmitida digitalmente.

O módulo gerenciador de experimentos (*Experiment Management Kernel*) tem como função coordenar os módulos e capturar informações relativas ao ambiente para posterior análise. Este gerenciador é configurado especificamente para cada experimento.

4.1.2 Arquitetura Implementada

A implementação da Pipe-SEC integra diversos simuladores já existentes de forma que seja possível a execução de experimentos. Sua integração ocorre por meio de

módulos de software desenvolvidos em formato de biblioteca ou de aplicação executável. A linguagem de programação predominante é a C#.NET, porém, também existem módulos desenvolvidos em Python ou C++.

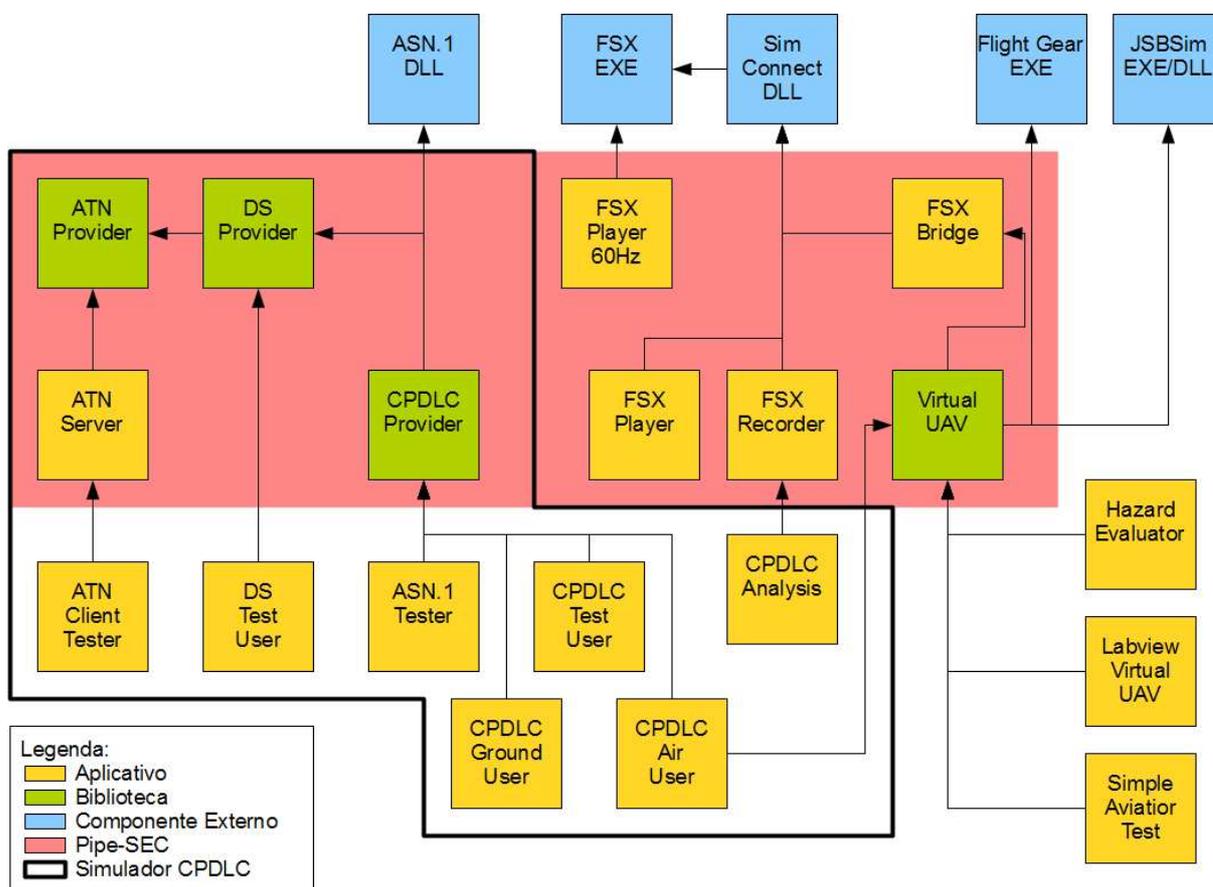


Figura 32 - Implementação da Pipe-SEC.

Para os módulos servidor de espaço aéreo (*Airspace Server*) e controlador de tráfego aéreo ($ATCo_j$) estão sendo utilizados os aplicativos desenvolvidos pela IVAO. Para o módulo simulador de aeronave (A_i), estão sendo utilizados simuladores de voo existentes.

O módulo gerenciador de experimento (*Experiment Management Kernel*) é implementado especificamente para cada estudo a ser executado na plataforma. Nesta pesquisa o aplicativo *CPDLC Analysis* foi desenvolvido para cumprir esta função.

Na parte de comunicação, foram desenvolvidos o servidor de comunicação (Communication Server) implementado no aplicativo *ATN Server*, as interfaces das aplicações CPDLC (*CPDLC Ground User* e *CPDLC Air User*), além de diversos módulos de apoio, compondo o Simulador CPDLC.

A Figura 32 apresenta os módulos implementados da plataforma para esta pesquisa. Na figura, a área colorida indica os módulos da Pipe-SEC enquanto a área contornada indica os módulos desenvolvidos nesta pesquisa: *ATN Provider*, *DS Provider*, *ATN Server*, *CPDLC Provider*, *ATN Client Tester*, *DS Test User*, *ASN.1 Tester*, *CPDLC Test User*, *CPDLC Ground User*, *CPDLC Air User*, *CPDLC Analysis*

4.2 SIMULADOR CPDLC

O simulador CPDLC, desenvolvido nesta pesquisa, compõe o módulo de comunicação digital da Pipe-SEC. Este módulo é subdividido fisicamente em um servidor e duas interfaces gráficas clientes. Todos compartilham um conjunto de bibliotecas que simula o protocolo CPDLC e DS especificados pela OACI sobre o IPS. Para auxiliar o desenvolvimento, e o entendimento dos protocolos, foram criados alguns aplicativos adicionais para se efetuar testes funcionais no módulo.

A Figura 33 apresenta os módulos do Simulador CPDLC organizado em camadas, para facilitar o relacionamento com as camadas apresentadas no item 2.3.4. A camada inferior implementa a rede ATN sobre o protocolo IP. As camadas *Dialog Service* e *CPDLC Provider* implementam as camadas destes protocolos enquanto a camada Aplicações CPDLC implementa as interfaces gráficas do controlador e do piloto. Ainda representado na figura, está o módulo Gerenciador de Experimento.

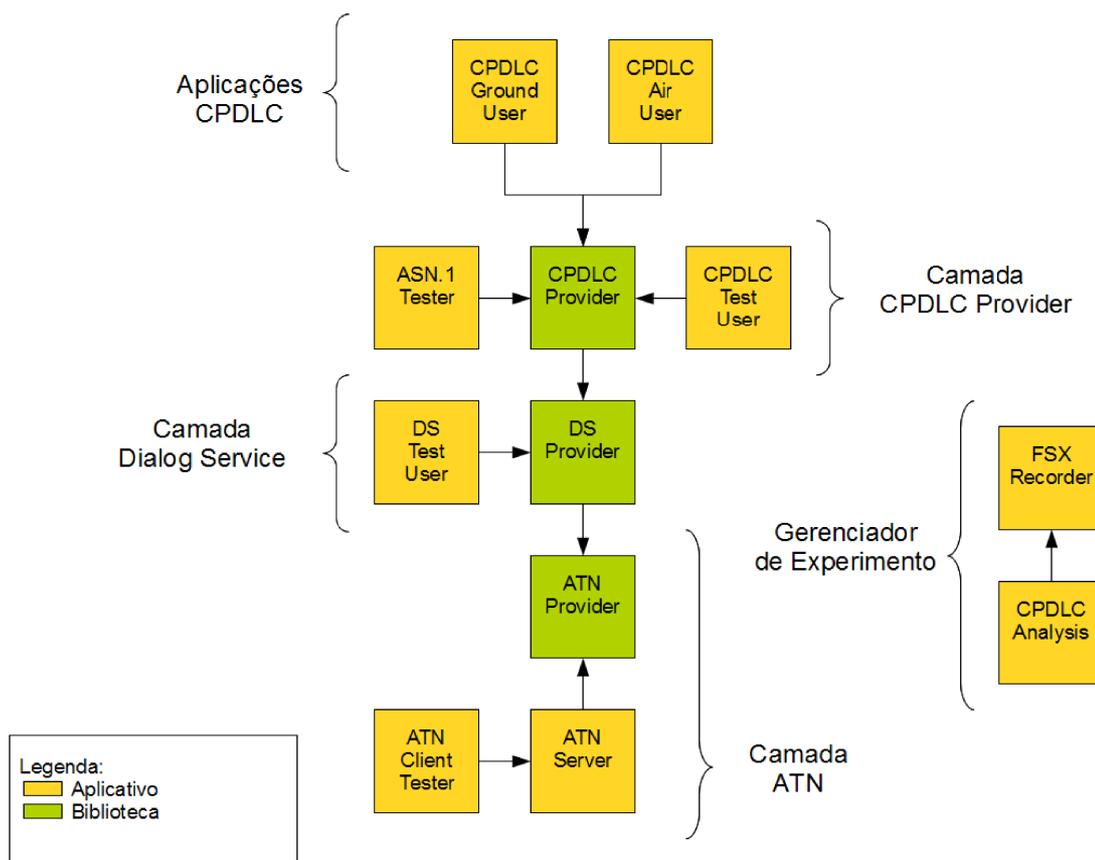


Figura 33 - Visão do Simulador CPDLC em camadas.

4.2.1 Camada ATN

Para simular a ATN, foi desenvolvido um servidor específico, o **ATN Server**, capaz de rotear os pacotes DS enviados. Para poder ser efetuado o monitoramento da rede, foi criada uma interface gráfica para o servidor, apresentada na Figura 34.

A interface do servidor possui, do lado esquerdo, uma área que lista os usuários conectados (*Current Users*), identificados pelo respectivo *CallSign*, que é o identificador utilizado pelas aeronaves e controladores na comunicação aeronáutica. No lado direito, são apresentadas as mensagens trocadas entre as aplicações CPDLC, informando o momento de recebimento (*Time*), o remetente (*From*) e o destinatário (*To*). A área inferior é usada para apresentar mensagens gerais de status do servidor ou *debug*.

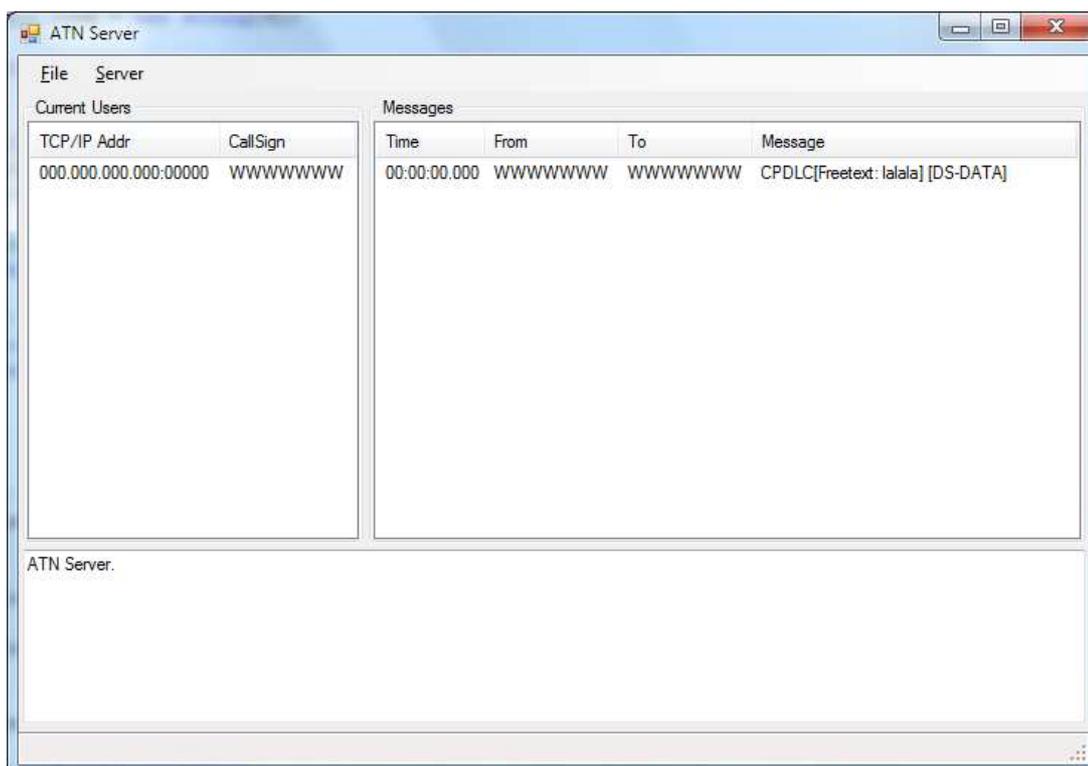


Figura 34 - Servidor ATN.

No funcionamento normal da ATN, descrito no item 2.3.1.2, as entidades que utilizam a rede podem se comunicar ponto-a-ponto sem a necessidade de um servidor. Porém, para ser possível a observação e interferência no funcionamento da ATN, foi criado este servidor intermediário. Pequenas modificações sobre a especificação foram introduzidas de forma a permitir o roteamento dos pacotes via servidor.

Para facilitar a utilização da rede ATN simulada, foi criada a biblioteca **ATN Provider**, que provê métodos para a troca de pacotes *ATNPKT*. Esta biblioteca é usada pelo servidor e também pelas aplicações CPDLC através do DS *Provider*.

Para se efetuar o teste do servidor, foi criado um aplicativo **ATN Client Tester**, que é capaz de gerar todos os tipos de pacotes *ATNPKT*, sem se ater a máquina de estados. Possibilitando inclusive a geração de situações inesperadas.

4.2.2 Camada *Dialog Service*

A camada *Dialog Service* implementa a camada *DS Provider*. Sua função é estabelecer o diálogo entre duas aplicações que utilizam a ATN. Sua funcionalidade foi implementada na biblioteca **DS Provider**. Esta biblioteca possui a descrição dos estados e primitivas do protocolo DS e o executa segundo sua especificação, descrita no item 2.3.3.

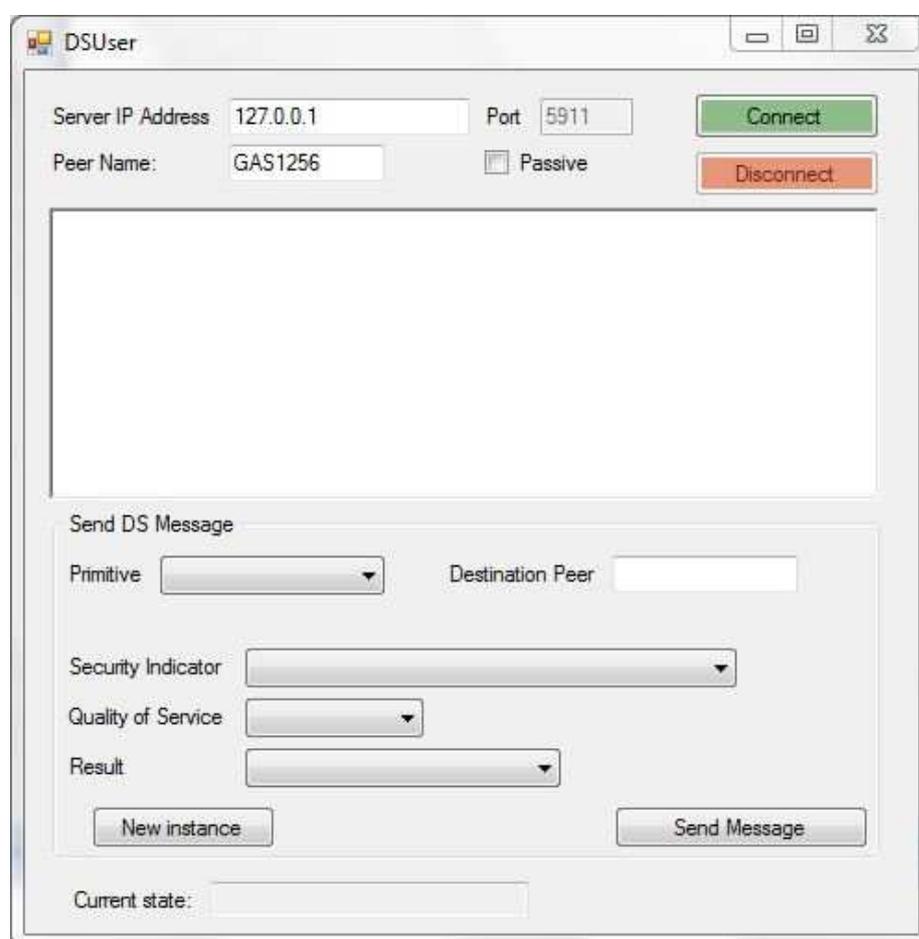


Figura 35 - Interface gráfica do DS Test User.

Para ser verificado o correto funcionamento da biblioteca **DS Provider**, foi desenvolvido o **DS Test User**. Este possui uma interface gráfica, apresentada na Figura 35, na qual é possível gerar-se qualquer mensagem DS, independente da ação da camada superior, conectando-se diretamente com o **ATN Server**. Na sua interface, é possível informar o endereço do servidor. No painel inferior (*Send DS*

Message) é possível compor qualquer mensagem do protocolo, enquanto a barra de status apresenta o estado atual do DS (*Current State*).

4.2.3 Camada CPDLC Provider

De forma análoga à camada *Dialog Service*, a camada CPDLC Provider implementa o CPDLC Service, descrito no item 2.3.4. Este protocolo foi implementado na biblioteca **CPDLC Provider**, que utiliza a biblioteca *DS Provider* para comunicar-se na ATN. A biblioteca *CPDLC Provider* implementa o funcionamento da máquina de estados CPDLC, com as seus estados e transições, e também permite a codificação de mensagens na linguagem ASN.1.

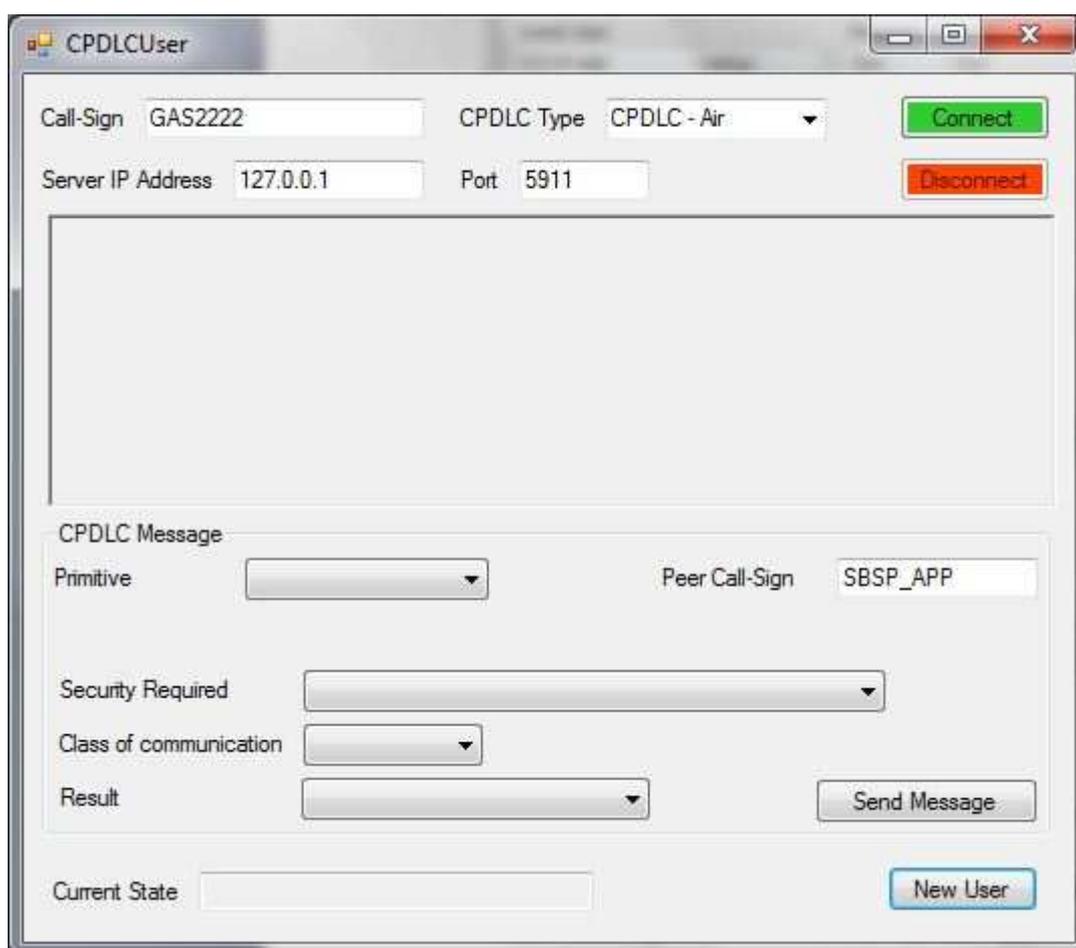


Figura 36 - Interface gráfica do CPDLC Test User.

O teste de funcionamento da camada pode ser efetuado pela aplicação **CPDLC Test User**, cuja interface está apresentada na Figura 36, similar ao DS *Test User*. Como o CPDLC possui duas máquinas de estados diferentes, uma para o controlador e outra para a aeronave, a aplicação permite a seleção por meio do campo *CPDLC Type*.

Para ser testado o funcionamento da codificação ASN.1, foi criado o aplicativo **ASN.1 Tester** que efetua a geração e verificação automática de mensagens CPDLC. Como existe uma grande possibilidade de mensagens, apenas alguns tipos são gerados, porém, sem prejuízo da verificação de funcionamento.

4.2.4 Aplicações CPDLC (CPDLC *Ground User* e CPDLC *Air User*)

Para completar a implementação do CPDLC, foram criadas duas aplicações CPDLC. Uma para ser utilizada por controladores, a **CPDLC *Ground User***, e uma para ser utilizada por pilotos, a **CPDLC *Air User***.

4.2.4.1 CPDLC *Ground User*

O controlador de tráfego aéreo usualmente possui um console no qual são apresentadas as informações radar e dos voos sob seu controle. Como na Pipe-SEC utiliza-se o console radar disponibilizado pela IVAO, cujo código fonte não é aberto, não é possível fazer a integração diretamente nesta interface. Por isso, foi construída uma interface em um aplicativo separado para ser utilizada em conjunto com o console radar.

A Figura 37 apresenta a janela inicial do aplicativo do controlador. Do lado direito, a janela apresenta uma lista de mensagens recebidas, identificando o horário de recebimento (*Time*), o remetente (*CallSign*) e o conteúdo da mensagem (*Message*). Do lado esquerdo, a janela apresenta uma lista de aeronaves sob jurisdição do

controlador. Para enviar uma mensagem, o controlador pode selecionar uma aeronave, ou responder diretamente a uma mensagem na lista de mensagens.



Figura 37 - Janela inicial do CPDLC *Ground User*.

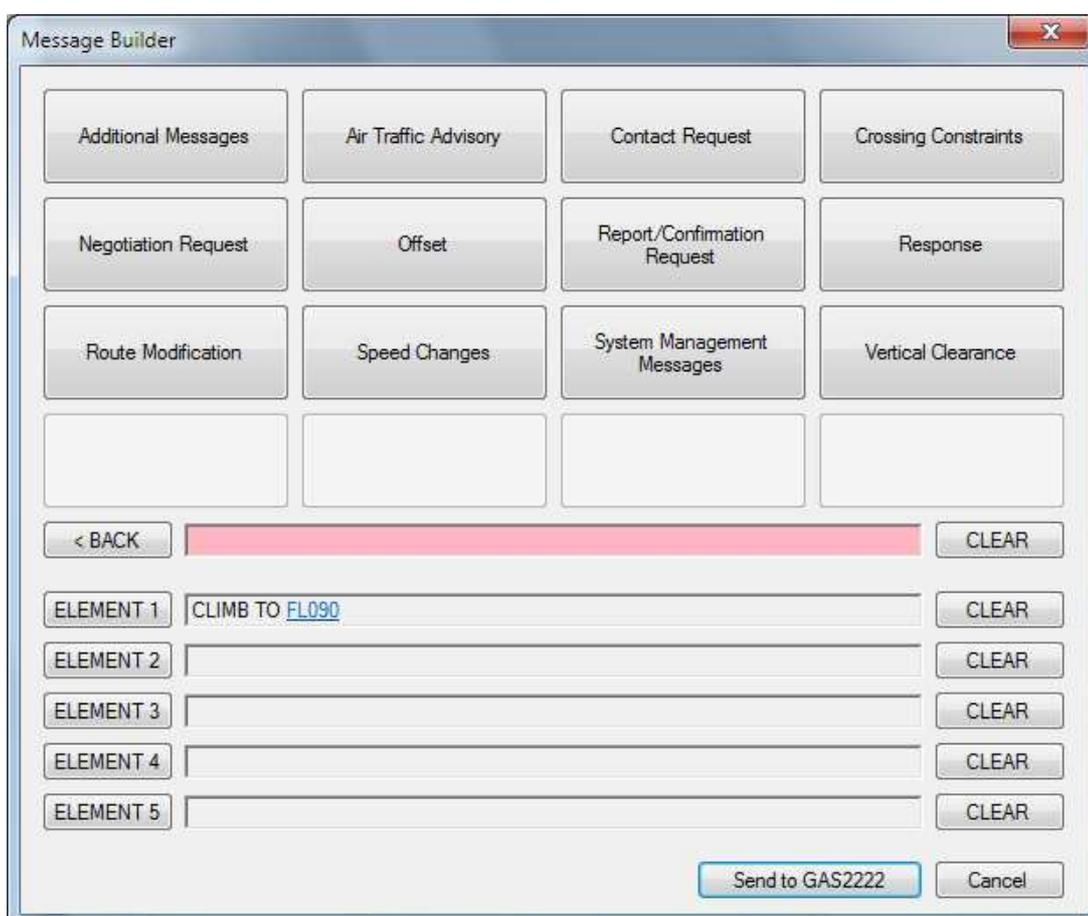


Figura 38 - Tela de composição de mensagens.

As mensagens simples, de confirmação de recebimento, autorização ou negação podem ser enviadas diretamente da janela inicial via um menu de contexto que surge ao ser selecionada uma aeronave ou mensagem recebida. Entretanto, no caso de mensagens complexas, foi criada uma janela auxiliar para composição de mensagens, apresentada na Figura 38.

A janela de composição de mensagens possui duas áreas principais. Acima existe uma área de botões na qual é possível navegar pela árvore de objetos da especificação ASN.1 do CPDLC, até encontrar o elemento desejado da mensagem. O elemento pode então ser armazenado em um dos 5 campos de entrada na parte inferior. Vale salientar que o controlador pode enviar até 5 informações diferentes para o piloto em uma única mensagem. Por exemplo, pode ser solicitada uma alteração de proa e altitude. Isto é descrito na linguagem ASN.1 como dois elementos distintos, podendo se combinados na mensagem final.

Após a seleção dos elementos, o controlador pode utilizar o *link* nos campos de entrada para especificar o valor dos dados da mensagem. No exemplo da figura, está inserido o elemento “CLIMB TO FL090”, sendo que o controlador pode clicar no *link* “FL090” e especificar outro valor. Por fim, a mensagem pode ser enviada ao piloto utilizando-se o botão *Send*.

4.2.4.2 Aplicação CPDLC *Air User*

Por sua vez, o piloto já possui algumas interfaces computacionais no painel de instrumentos da aeronave. Uma das implementações do CPDLC atuais utiliza a interface do computador de bordo também para a aplicação CPDLC (DICKINSON; MINNIX, 2000). Como os simuladores de voo não possuíam tal funcionalidade, foi desenvolvida uma interface semelhante que poderá ser utilizada simultaneamente ao simulador de voo.

A Figura 39 apresenta a interface gráfica do **CPDLC Air User**. Esta interface possui um *display* de informações (em fundo preto), botões de acesso rápido, de ambos os lados do *display* como os encontrados nos caixas eletrônicos, e botões com funções específicas na parte inferior. Na tela inicial, mostrada na figura, pode-se configurar o aplicativo (*CONFIG*), alterar as informações de identificação (*IDENT*) e comunicar-se com o controlador (*ATC*).

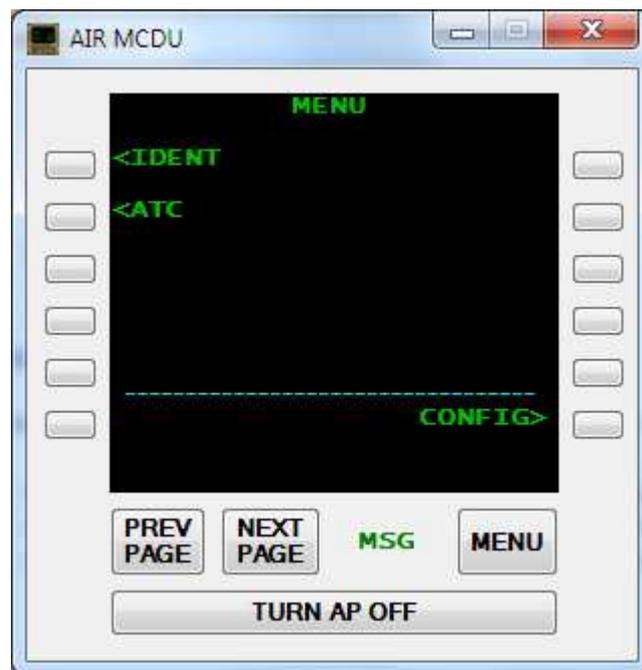


Figura 39 - Interface do piloto.

Por meio dos botões de acesso rápido, o piloto pode navegar na árvore de objetos das mensagens CPDLC e configurar os dados necessários, da mesma forma que ele já está acostumado à configurar o computador de bordo. A Figura 40 apresenta a tela de solicitação de mudança de nível de voo. O campo *LEVEL* indica que o piloto deseja subir (ou descer) ao nível FL090, que representa 9000 pés. Para esta mensagem podem ser adicionados outros elementos, pois da mesma forma que para o controlador, o piloto pode enviar até 5 informações em uma mesma mensagem.

Os botões *NEXT PAGE* e *PREV PAGE* são usados para troca de páginas para o caso nos quais a exibição ou composição de uma mensagem ultrapasse uma página do *display*. O botão *MENU* volta à tela inicial.



Figura 40 - Exemplo de solicitação de nível de voo.



Figura 41 - Tela de recebimento de mensagens.

No caso de recebimento de mensagens, um alerta visual é emitido com a mudança da cor do indicador MSG, de verde para vermelho. Na Figura 41 é apresentado o recebimento de uma resposta negativa (*NEGATIVE*) à uma requisição anterior do piloto. O indicador MSG volta ao seu estado original após a leitura das mensagens

recebidas. Nesta tela (*ATC LOG*) é possível, a qualquer momento, consultara o histórico de mensagens recebidas.

Por fim, uma funcionalidade adicional implementada é a comunicação direta com o computador de bordo da aeronave no simulador de voo. Quando uma mensagem é recebida, esta é interpretada e o seu comando é inserido diretamente no computador de bordo. Caso o piloto perceba uma situação insegura ou mensagem incorreta, este pode desabilitar a conexão apertando o botão *TURN AP OFF*.

4.2.5 Gerenciador de Experimento

O módulo gerenciador de experimento desta pesquisa é composto por dois aplicativos: **FSX Recorder** e **CPDLC Analysis**.

O aplicativo **FSX Recorder** é um aplicativo preexistente da Pipe-SEC que permite a gravação de um voo realizado no simulador FSX. São gravadas as informações de posição (latitude, longitude, proa e altitude) e de velocidade da aeronave ao longo do tempo. Estes dados são armazenados em um arquivo para posterior análise.

O aplicativo **CPDLC Analysis**, criado nesta pesquisa, possui duas funções principais: analisar os dados do *FSX Recorder* e efetuar cálculos para análise da rede seguindo a metodologia de análise de segurança desenvolvida.

A tela de análise dos dados do *FSX Recorder* é apresentada na Figura 42. Nesta tela é possível avaliar o comportamento de duas aeronaves, observando-se o seu posicionamento horizontal (lateral esquerda) e vertical (canto direito superior). Além disso, esta tela apresenta o gráfico da distância das aeronaves em função do tempo (canto direito inferior) o ajuste da defasagem (*offset*) entre elas.

A Figura 43 apresenta a tela de análise das redes de comunicação. Nesta tela é possível gerar-se a massa de dados, combinar-se as trajetórias de voo gravadas,

selecionar os parâmetros da rede e analisar os resultados obtidos através do painel gráfico (lateral direita). Este aplicativo foi utilizado para a execução dos cálculos e obtenção dos resultados apresentados no Capítulo 6.

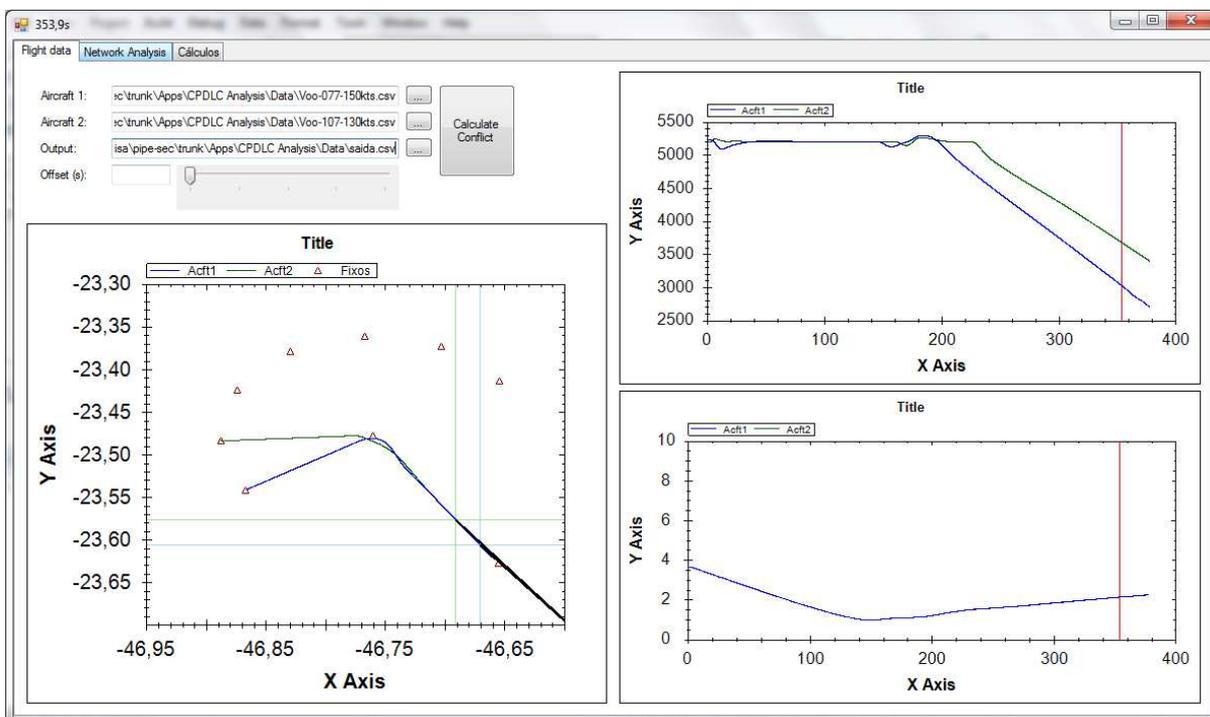


Figura 42 - Tela de análise dos dados do FSX Recorder.

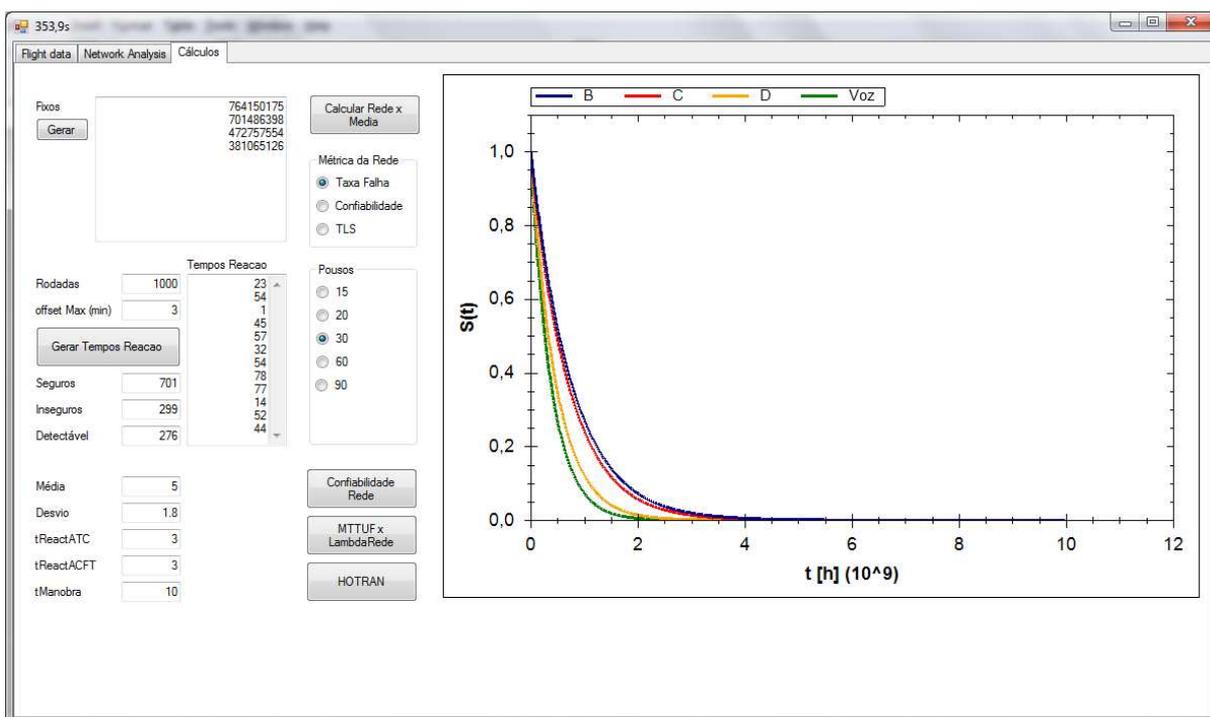


Figura 43 - Tela de análise das redes de comunicação.

5 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DA COMUNICAÇÃO

Em uma região TMA, as aeronaves estão manobrando para sair da Terminal ou para pousar. Estas manobras são coordenadas e supervisionadas pelo ATCo. Nesta fase do voo, o CPDLC é necessário para que as aeronaves se mantenham afastadas, visando a segurança. Esta é uma região na qual ocorrem diversas mudanças de direção e velocidade, sendo que as aeronaves frequentemente estão em subida ou descida, e não niveladas como no caso do trecho em rota.

Tendo como referência a Terminal São Paulo e o aeroporto de Congonhas, foi desenvolvida uma metodologia que, dado um cenário base, é possível se avaliar o impacto da comunicação digital na segurança da região. Para tanto foi utilizado o simulador CPDLC, desenvolvido nesta pesquisa, um simulador de voo de tempo real comercial (FSX), e por fim, feita uma avaliação da segurança por meio de um modelo de Markov.

5.1 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto do CPDLC na segurança do espaço aéreo em Áreas Terminais.

A segurança do espaço aéreo pode ser medida observando-se a probabilidade de colisão entre duas aeronaves que compartilham a mesma região. O impacto do CPDLC pode ser avaliado em função das diferentes capacidades e atrasos do enlace de dados.

Assim, deseja-se observar a variação do nível de segurança em função do tipo de rede de comunicação, levando-se em consideração diversos cenários de manobra.

5.2 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida nesta pesquisa pode ser dividida em 5 etapas. A partir de um cenário base de estrutura e demanda do espaço aéreo, são escolhidas trajetórias de voo e demandas para serem simuladas (Etapa 1). Em seguida, é realizada a simulação física desses voos dando origem a uma massa de dados para cada demanda (Etapa 2).

Este conjunto de dados é analisado (Etapa 3), gerando três importantes métricas para a pesquisa: a *Taxa de Aproximações Inseguras* (λ_{App}), o *Tempo Máximo de Reação* ($\Delta T_{Max_Reação}$) e a *Probabilidade de Colisão* ($P_{colisão}$). De posse do *Tempo Máximo de Reação*, é possível se obter a *Taxa de Falhas da Rede* (λ_{Rede}) através da análise da confiabilidade da rede (Etapa 4).

Combinando-se as métricas observadas e calculadas com a *Cobertura do ATCo* (C_{ATCo}) é possível analisar a segurança do sistema por meio de um modelo de Markov (Etapa 5). Por fim, a metodologia permite que o *Nível de Segurança* (TLS) de cada tipo de rede em função da demanda do espaço aéreo possa ser comparado com os demais e com os valores de referência e do sistema atual.

A Figura 44 apresenta a visão geral da metodologia representada por meio de um diagrama de processo de negócio. Pode-se observar a interligação das etapas, as métricas geradas e consumidas por cada etapa e os dados de entrada e saída. Em destaque estão as etapas 2 e 3, nas quais foram utilizados módulos da Pipe-SEC desenvolvidos durante esta pesquisa e incorporados à plataforma.

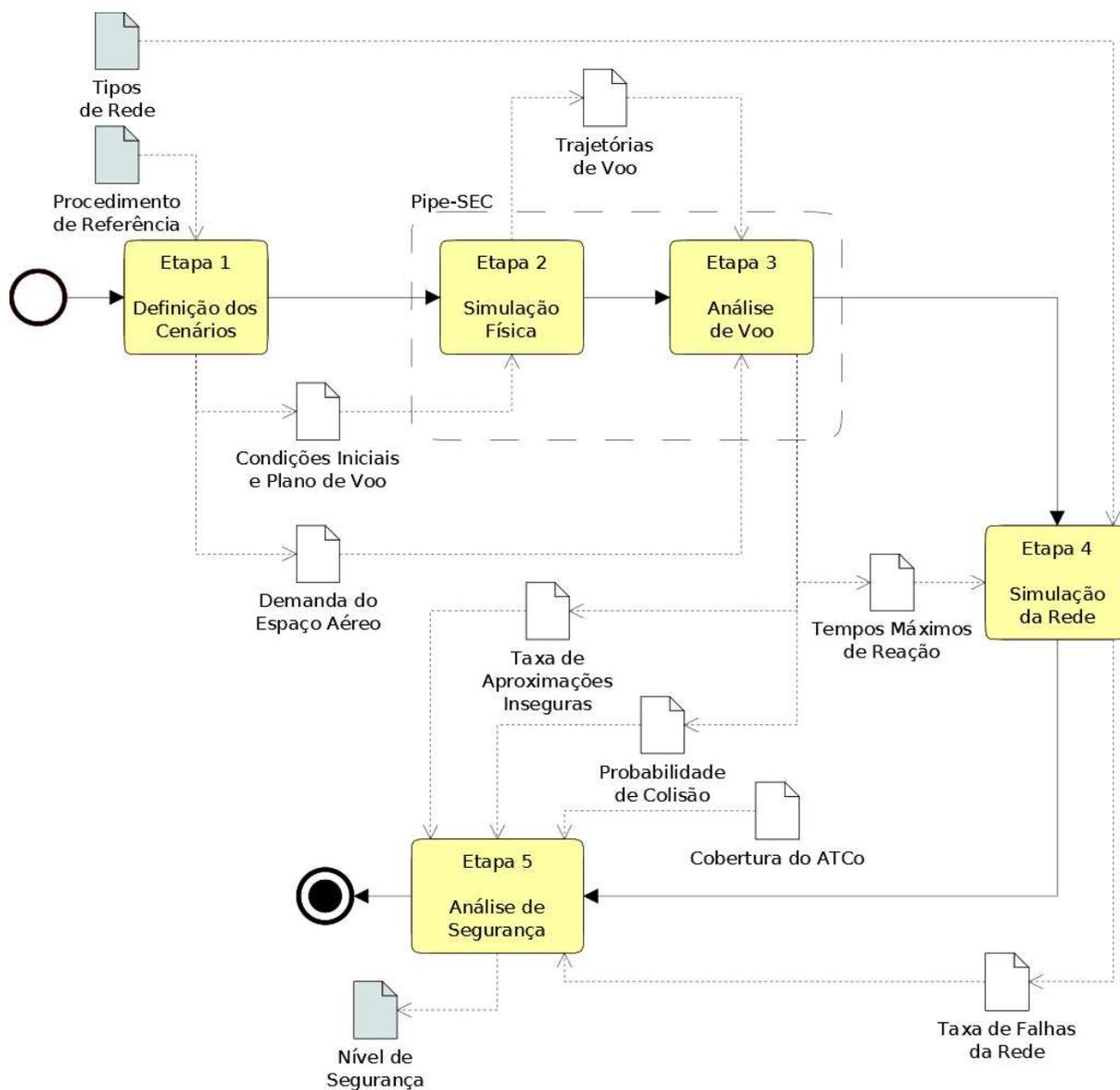


Figura 44 - Visão Geral da Metodologia.

5.3 ENTRADAS DO PROCESSO

Nesta metodologia são necessárias duas entradas: o Procedimento de Referência e os Tipos de Rede. O procedimento pode ser escolhido dentre os utilizados no espaço aéreo enquanto que os tipos de rede podem ser selecionadas a partir das classes ATSC publicadas pela OACI (ICAO, 1999).

5.3.1 Procedimento de Referência

O cenário de manobra simulado representa o cruzamento de duas aeronaves em procedimento de chegada, ou aproximação, tendo como base a Terminal São Paulo (TMA-SP) e o aeroporto de Congonhas (SBSB). Nesta região, a Aeronáutica estabelece diversos procedimentos de aproximação. O procedimento adotado como referência para o cenário base é o publicado na carta "IAC RNAV (GNSS) RWY 17R" (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2010). Este procedimento compreende a aproximação da aeronave com destino à pista 17R de Congonhas.

Nesta carta, cada aeronave chega ao ponto de cruzamento (EVER) e efetua uma curva para interceptar a rampa de aproximação final. Até a chegada ao aeroporto (RWY17R) as aeronaves devem permanecer separadas o suficiente para não infringirem as normas do ATC. Neste cenário, os conflitos entre aeronaves podem surgir pois nesta região há duas rotas distintas de aproximação:

- SANTANA → EVER → SP362 → RW17R; e
- ZEKA → EVER → SP362 → RW17R.

A Figura 45 é um recorte da carta de aproximação por instrumentos da região, na qual é possível observar as duas rotas citadas. Como pode ser visto, ambas as rotas convergem em EVER e possuem o mesmo trecho final.

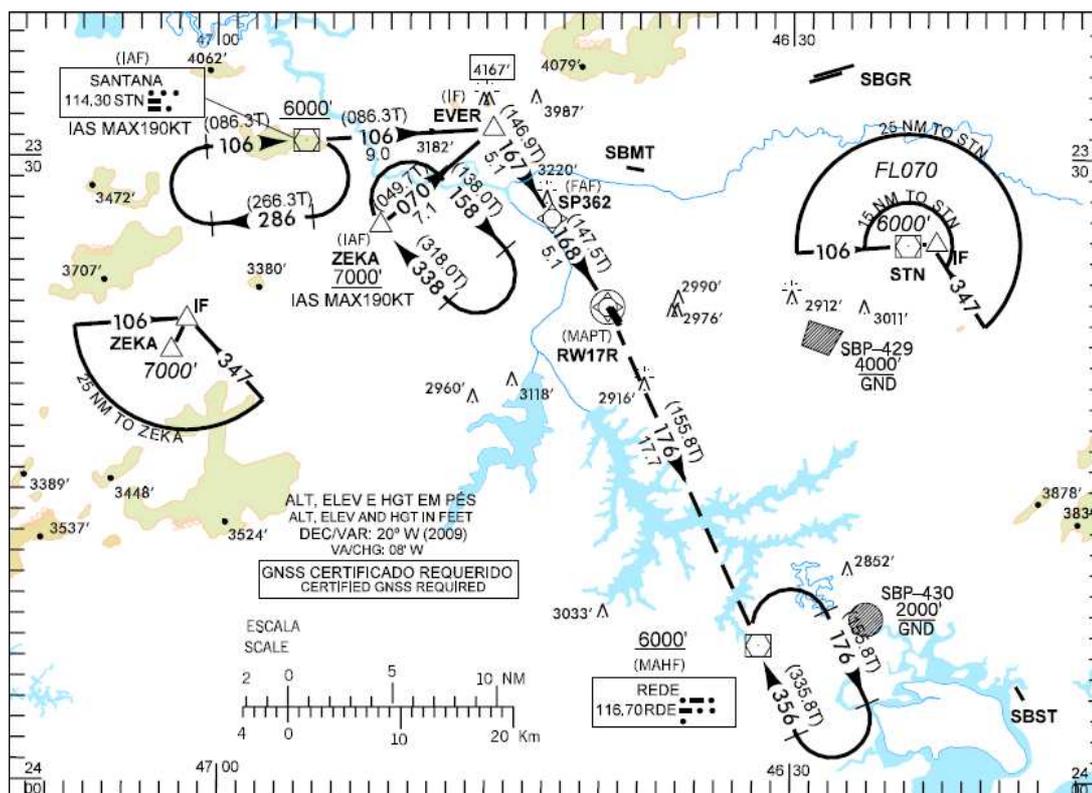


Figura 45 - Aproximação RNAV em Congonhas. Fonte: (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2010)

O procedimento se inicia nos *Fixos de Entrada* (FE) STN ou ZEKA. Poucos instantes após a aeronave atingir um dos fixos, o seu controle é passado para o controlador da aproximação final da TMA-SP.

Durante todo o procedimento as aeronaves não podem exceder 190kt e, após os fixos de entrada, estão em descida constante. Porém, não é estabelecido uma velocidade mínima, ficando a critério do ATCo ou do desempenho da aeronave.

A aeronave executa uma curva à direita e se estabiliza na rampa de descida com a proa 167°. No *Fixo de Saída* SP362 o procedimento termina, ponto no qual a aeronave é transferida ao controlador da Torre Congonhas.

Na carta também estão definidos os fixos RW17R, que representa a pista 17R de Congonhas, e RDE, ponto para o qual a aeronave deve se dirigir nos casos de aproximação perdida.

Deseja-se estudar o caso de duas aeronaves iniciarem o procedimento de chegada quase simultaneamente. Isto é, ambas as aeronaves desejam pousar no aeroporto e iniciam o procedimento cada qual por um fixo de entrada. Nestes casos, podem ocorrer atrasos variáveis no início de cada aproximação. Como cada aeronave utiliza uma velocidade distinta da outra, esta convergência é uma situação potencial de conflitos.

O controlador fica monitorando o espaço aéreo de forma a evitar tais conflitos. Caso o par de aeronaves entre em situação de conflito, o controlador envia mensagens aos pilotos para que alterem o seu plano de voo. Tais mensagens, enviadas no formato CPDLC, podem solicitar alterações de velocidade, altitude e proa (direção), de forma que o conflito seja sanado (KUCCHAR; YANG, 2000).

As mensagens CPDLC trafegam pela ATN, sendo todas as mensagens da camada CPDLC e DS executadas, bem como as máquinas de estados correspondentes. Após o intervalo de tempo aleatório, que representa a demanda da respectiva rede de comunicação, a mensagem chega ao piloto. Após a chegada da mensagem, o piloto altera a configuração do piloto automático, alterando assim o movimento da aeronave de acordo com o solicitado.

Neste processo alguns momentos na linha do tempo podem ser mensurados. O instante inicial, T_0 , é aquele no qual as aeronaves iniciam o procedimento de descida, nos fixos de entrada. Em seguida, as aeronaves se dirigem ao ponto de convergência (EVER). No momento em que uma das aeronaves invade a zona de alerta da outra é detectada a possibilidade de conflito pelo controlador, sendo este instante o $T_{\text{deteccção}}$. Em seguida, existe o tempo de reação do controlador, $\Delta t_{\text{reac_atc}}$, o tempo de transmissão da mensagem na rede de comunicação, $\Delta t_{\text{transmissão}}$, o tempo de reação do piloto, $\Delta T_{\text{reac_piloto}}$, e por fim, o tempo que as aeronaves demoram a realizar a manobra de solução de conflito, $\Delta t_{\text{manobra}}$.

Dada a configuração inicial do cenário, é possível calcular, no momento de detecção, $T_{\text{deteccção}}$, o tempo máximo possível para que uma mudança de trajetória solucione o conflito, aqui chamado de $\Delta t_{\text{max_reação}}$. Esse tempo máximo é avaliado até

o instante em que uma aeronave invade a zona de proteção da outra aeronave (T_{conflito}). Assim, pode-se dizer que a rede de comunicação é segura caso:

$$\Delta T_{\text{max_reação}} \geq \Delta T_{\text{Final}}$$

$$T_{\text{Conflito}} - T_{\text{Deteção}} \geq T_{\text{Final}} - T_{\text{deteção}}$$

$$T_{\text{Conflito}} \geq T_{\text{final}}$$

$$\text{Onde, } T_{\text{final}} = \Delta T_{\text{reac_atc}} + \Delta T_{\text{transmissão}} + \Delta T_{\text{reac_piloto}} + \Delta T_{\text{manobra}}$$

A Figura 46 apresenta a linha de tempo, identificando os instantes e intervalos de tempo relevantes que são medidos no decorrer da simulação.

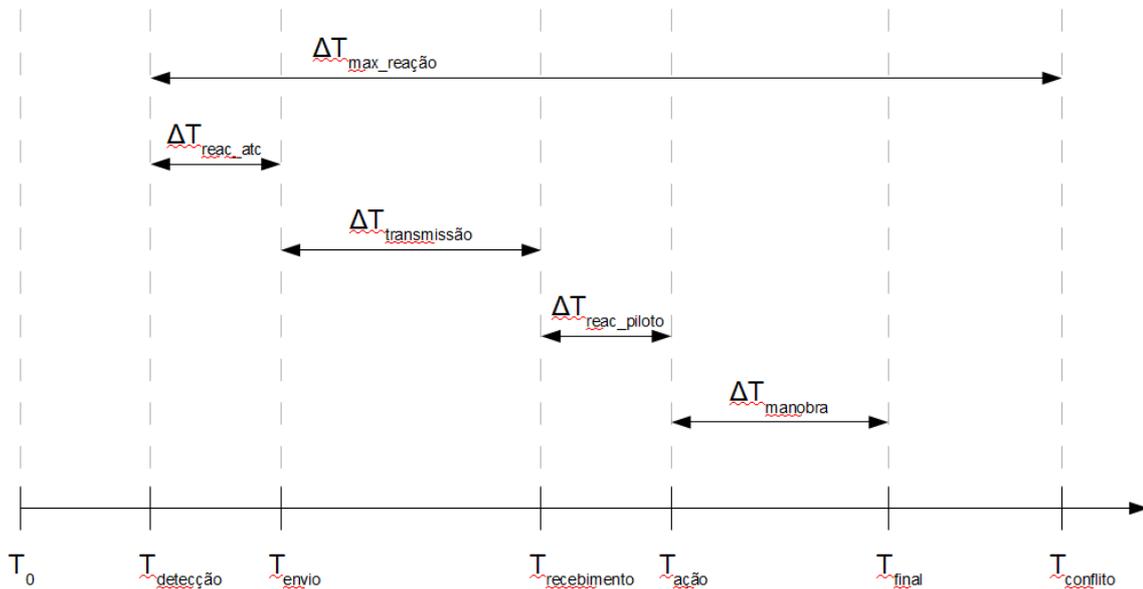


Figura 46 - Intervalos de tempo da simulação.

As principais características deste procedimento são a convergência de duas rotas de aproximação para uma rampa de descida, a restrição de velocidade máxima e a transferência entre controladores.

Os pontos de entrada no procedimento, *Fixos de Entrada*, definem as *Proas de Entrada* com as quais a aeronave inicia o procedimento. No caso do procedimento de referência, as proas de STN e ZEKA são 106° e 70° respectivamente. De forma análoga, a *Proa de Saída* pode ser definida como a proa com a qual a aeronave termina o procedimento. Para o procedimento de referência, esta proa é 167° ; a qual está alinhada com a pista 17R.

A Figura 47 apresenta a Proa de Entrada e a Proa de Saída no cenário base. A proa de saída é fixada em 167° ; refletindo o procedimento de referência. A partir das proas, definem-se os fixos FE_n (com n de 0 a 6). Tanto no cenário base como no procedimento de referência o ponto de convergência é EVER.

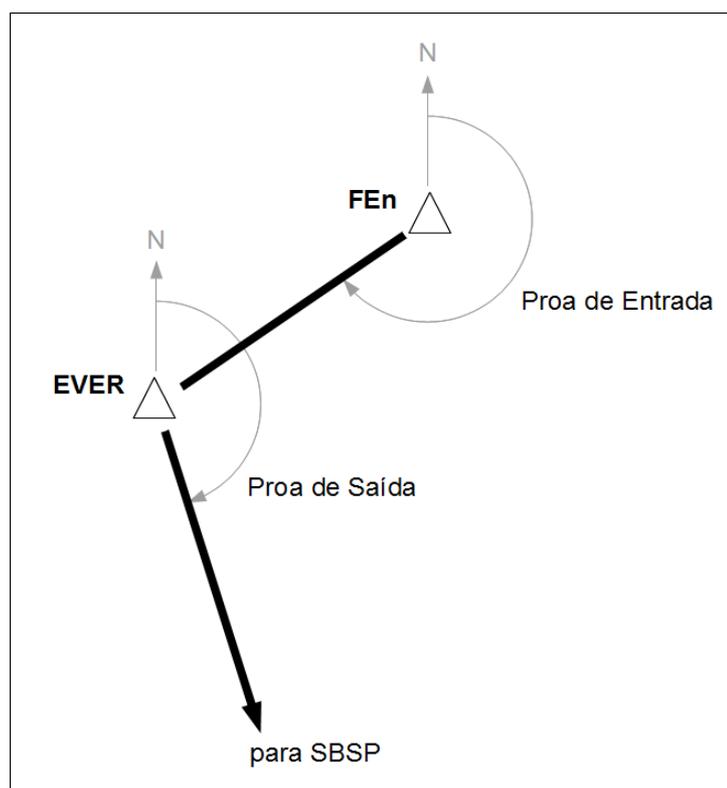


Figura 47 - Proas de entrada e saída.

O Cenário Base é definido então pelo conjunto de proas de entrada, proa de saída, fixos de entrada, fixo de saída, ponto de convergência e velocidades iniciais.

5.3.2 Tipos de Rede

Nesta pesquisa as redes são modeladas quanto aos seus requisitos de desempenho. Tanto as redes digitais, utilizadas pelo CPDLC, quanto a analógica, utilizada pela de voz, podem ser descritas segundo uma distribuição do tempo de transmissão das mensagens.

Dessa forma, o tipo de rede é descrito por uma distribuição probabilística. Aqui é adotada a distribuição Normal Truncada, referenciada por $N(\text{média}; \text{desvio padrão})$.

5.3.3 Cobertura do ATCo (C_{ATCo})

Em uma situação de conflito, podem acontecer os seguintes eventos:

- (a) O controlador detectar o conflito primeiro; ou
- (b) O piloto da aeronave A detectar o conflito primeiro; ou
- (c) O piloto da aeronave B detectar o conflito primeiro; ou
- (d) O conflito não ser detectado.

A cobertura do ATCo (C_{ATCo}) é definida aqui como a probabilidade de ocorrer o evento (a). Esta probabilidade pode variar de controlador para controlador, de acordo com a complexidade da região de controle e com a carga de trabalho do controlador.

Como as aeronaves utilizam o TCAS, que reduz a probabilidade de conflito em 98%, não serão contabilizados os casos de não detecção do conflito.

5.4 ETAPA 1 – DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

A primeira etapa da metodologia é a definição dos cenários que serão simulados. De posse do Procedimento de Referência a ser estudado, pode-se selecionar os planos de voo e a demanda do espaço aéreo que represente o caso de interesse.

5.4.1 Condições Iniciais e Plano de Voo

As condições iniciais refletem a configuração e posicionamento da aeronave no instante de entrada no procedimento. Estas condições fornecem subsídio para a configuração inicial do simulador de voo.

A condição inicial é definida pela latitude, longitude, altitude, proa e velocidade da aeronave no instante inicial. A latitude, longitude e altitude são informações de posicionamento, obtidas dos fixos de entrada. A proa também representa o posicionamento inicial da aeronave e é obtida da proa de entrada do fixo correspondente. A velocidade pode ser selecionada entre as velocidades mínimas e máximas do cenário.

Além disso, é importante estabelecer as demais configurações da aeronave, tais como posição de *flaps*, ângulos de inclinação lateral e atitude, ajustes dos instrumentos, parâmetros do piloto automático, etc correspondentes aos valores utilizados usualmente pelos pilotos profissionais para o tipo de trajetória desejada.

O plano de voo compreende os passos necessários para o cumprimento do procedimento de aproximação. O plano compreende os fixos de entrada, convergência e saída, a velocidade e proa com as quais deve-se interceptar cada fixo e a taxa de descida proporcional à velocidade da aeronave para que esta execute a descida correta na rampa de pouso.

5.4.2 Demanda do Espaço Aéreo

Usualmente, a utilização de um aeroporto, ou uma região do espaço aéreo, é medida em movimentos por hora (ANAC, 2009). Esta taxa mede tanto as aeronaves que chegam quanto as que saem. Como nesta pesquisa deseja-se estudar o procedimento de chegada, será utilizada uma métrica derivada dessa: o número de pousos por hora.

Assim, a Demanda do Espaço Aéreo pode ser definida como o número de pousos por hora em um aeroporto. Esta métrica pode ser obtida de dados históricos ou de autorizações de planos de voo emitidas pelos órgãos de gerenciamento do transporte aéreo. No Brasil, estas autorizações são emitidas pela ANAC, que disponibiliza publicamente a lista de voos regulares na *Internet*.

A Figura 48 apresenta o movimento autorizado de aeronaves regulares em vigor no aeroporto de Congonhas para cada dia da semana, extraídos de (ANAC, 2011). Durante os dias úteis (segunda-feira a sexta-feira) o movimento é o mesmo. Atualmente o aeroporto opera com uma restrição operacional de 34 movimentos/h. Este pico é atingido três vezes ao longo do dia, às 9, 14 e 19 horas.

Observando-se apenas o número de pousos, nota-se na Figura 49 que este número é menor do que o número de movimentos. O pico de pousos é atingido às 14h dos dias úteis, momento no qual ocorrem 19 pousos em uma hora.

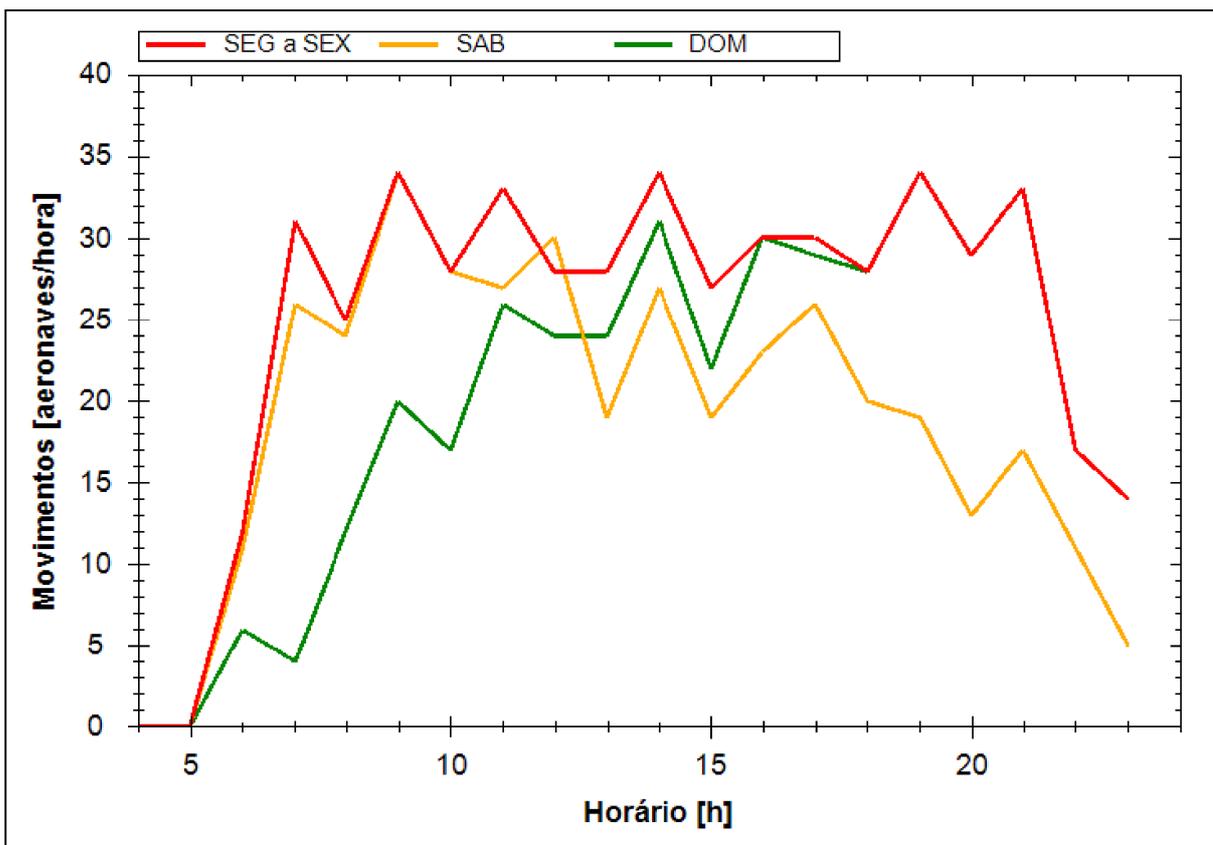


Figura 48 - Movimentos por hora no aeroporto de Congonhas.

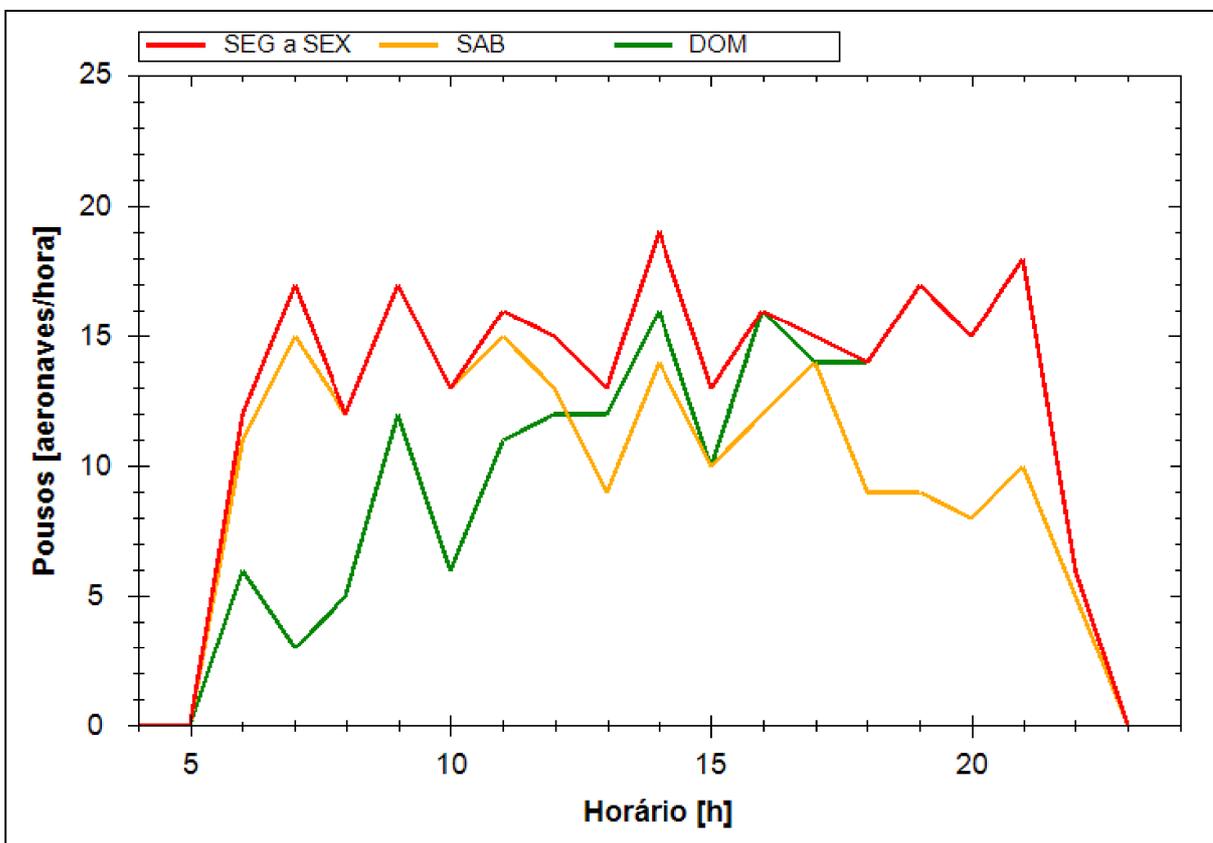


Figura 49 - Pousos por hora no aeroporto de Congonhas.

5.5 ETAPA 2 – SIMULAÇÃO FÍSICA

Na etapa de Simulação Física obtém-se as trajetórias de voo desejadas, de acordo com as condições iniciais e plano de voo definidos. As trajetórias selecionadas podem ser obtidas pela simulação de voo tanto com simuladores de tempo acelerado como de tempo real.

Nesta pesquisa, devido ao pequeno número de trajetórias, estas podem ser simuladas utilizando o simulador de tempo real FSX. Porém, os simuladores de tempo acelerado também poderiam ser utilizados, pois para esta metodologia não é necessária a interação de um piloto humano. A escolha do FSX deve-se ao fato de que este já modela fisicamente os tipos de aeronave comerciais mais comuns e permite a utilização do piloto automático para realização dos voos.

5.5.1 Trajetórias de voo

Uma trajetória de voo é definida pelas condições iniciais e plano de voo. Além disso, deve-se determinar a configuração na qual a aeronave utilizada usualmente executa o tipo de trajetória escolhida.

Para cada trajetória, as condições iniciais são estabelecidas no simulador de voo. Em seguida, o voo é executado utilizando-se o piloto automático e gravado em tempo real. A gravação é feita pelo módulo *FSX Recorder* da Pipe-SEC. Este módulo armazena as coordenadas de posição e velocidade da aeronave ao longo do tempo. Para esta metodologia, é necessário o armazenamento das variáveis: latitude, longitude, altitude, proa e velocidade para cada instante de tempo.

A latitude e longitude da aeronave definem o seu posicionamento horizontal. Estas são medidas angulares em relação ao padrão WGS84, utilizado pelo sistema GPS e pela Aeronáutica para navegação (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2009c). A altitude é

medida em relação ao nível do mar (ASL), também é referenciada no WGS84 e é medida em pés.

A proa da aeronave é a medida, em graus, da diferença entre o seu eixo longitudinal e o Norte magnético. No Brasil, o norte magnético tem uma defasagem de 20° para Oeste, medida em 2011. Portanto, os valores utilizados nos cálculos geodésicos são corrigidos em -20° (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2010).

A velocidade utilizada é a velocidade indicada (IAS). Esta velocidade é a apresentada no painel de instrumentos da aeronave e utilizada pelo piloto automático. Como aqui não está se considerando vento e as variações de altitude são pequenas, a velocidade indicada não varia em relação à velocidade real da aeronave.

5.6 ETAPA 3 – ANÁLISE DE VOO

Esta terceira etapa gera e analisa os voos descritos na definição do cenário. A geração é feita pela combinação das trajetórias de voo duas a duas, com uma defasagem definida pela demanda escolhida.

Em seguida, a massa de dados é gerada, sendo utilizada para o cálculo dos tempos envolvidos, dando origem aos *Tempos Máximos de Reação* ($\Delta T_{\text{Max_Reação}}$). Filtrando-se os dados obtidos, pode-se determinar posteriormente a *Taxa de Aproximações Inseguras*.

Por fim, a *Probabilidade de Colisão* é calculada em cima da massa de dados de aproximações. A Figura 52 explicita a sequencia de cálculos e os dados extraídos em cada passo.

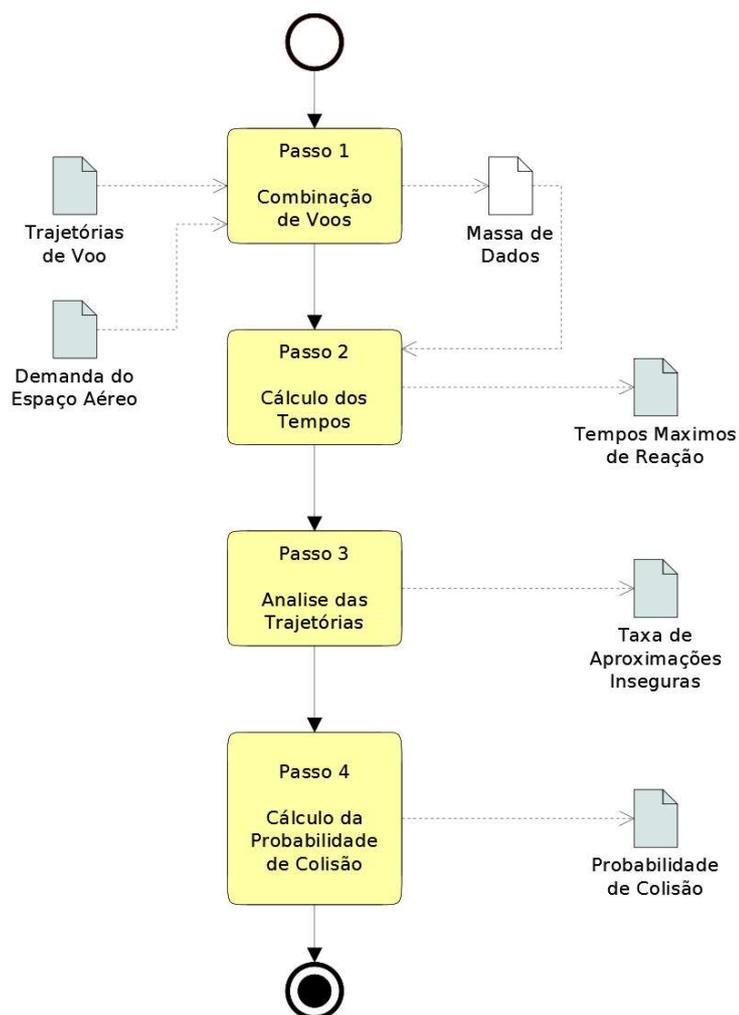


Figura 50 - Diagrama da Etapa 3.

5.6.1 Combinação de voos - Massa de Dados

A Massa de Dados considerada na pesquisa é definida como o conjunto de trajetórias combinadas, para uma dada demanda. Uma demanda do espaço aéreo é definida como o número de pousos por hora em um determinado aeroporto. Invertendo-se esta taxa, obtém-se o intervalo de tempo médio no qual os pousos ocorrem.

Dessa forma, para uma dada demanda, podem ser sorteadas aleatoriamente

defasagens aproximadas de $\frac{1}{\text{demanda}} \pm \text{atraso médio}$, onde o atraso médio reflete a

variação na taxa de chegadas dos voos. Em seguida, faz-se o sorteio de um par de trajetórias e de uma defasagem. As trajetórias são então combinadas duas a duas em uma única linha de tempo.

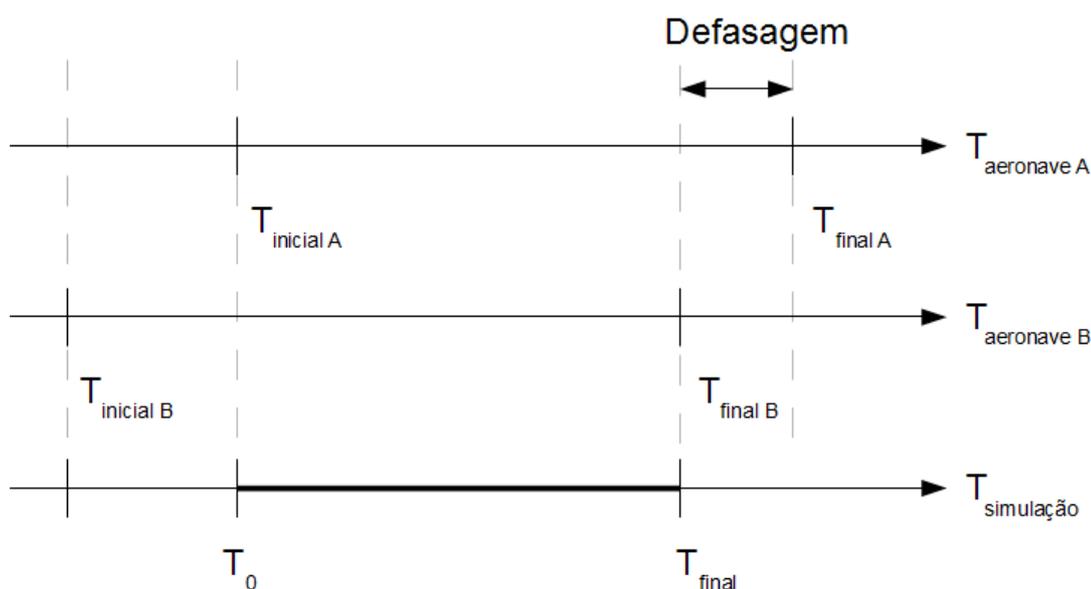


Figura 51 - Linha de tempo combinada.

A Figura 51 apresenta as linhas de tempo das aeronaves A e B ($T_{aeronave A}$ e $T_{aeronave B}$) e a linha combinada. Será considerada para a geração da massa de dados, apenas o trecho entre T_0 e T_{final} , destacados na linha de tempo da simulação ($T_{simulação}$), sendo:

$$T_0 = \max(T_{inicial a}; T_{inicial b} + Defasagem)$$

$$T_{final} = \min(T_{final a}; T_{final b} + Defasagem)$$

5.6.2 Cálculo dos Tempos - Tempo Máximo de Reação ($\Delta T_{Max_Reação}$)

De posse da massa de dados de voos combinados. Pode-se determinar os tempos nos quais ocorre invasões nas zonas de alerta e proteção e, conseqüentemente, o tempo máximo de reação que o controlador tem para alertar o piloto antes da colisão.

O $T_{\text{detecção}}$ é o momento no qual uma das aeronaves invade a Zona de Alerta da outra. Como ambas as zonas são definidas com cilindros, não basta que apenas os cilindros se toquem. É necessário que uma das aeronaves esteja dentro da zona da outra. A Figura 52 mostra duas aeronaves aproximando-se e a Figura 53 mostra a ocorrência o instante de detecção do conflito.

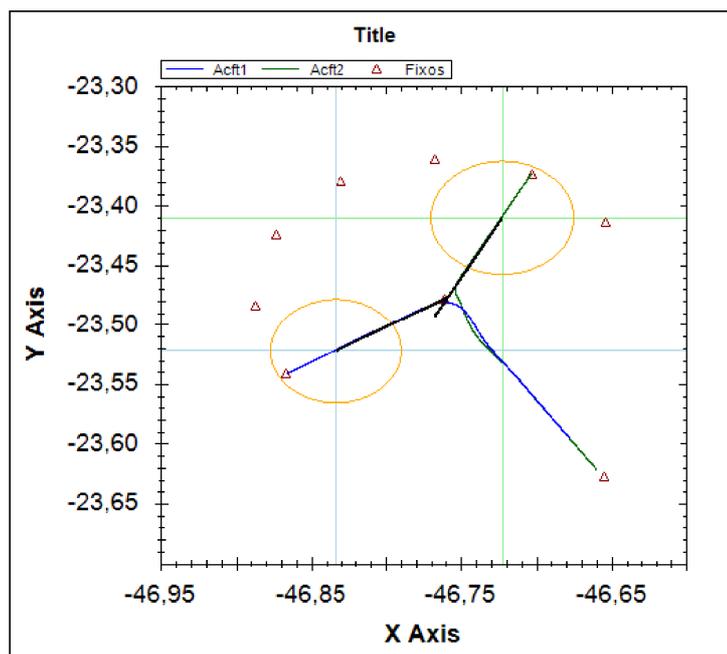


Figura 52 - Convergência de duas aeronaves.

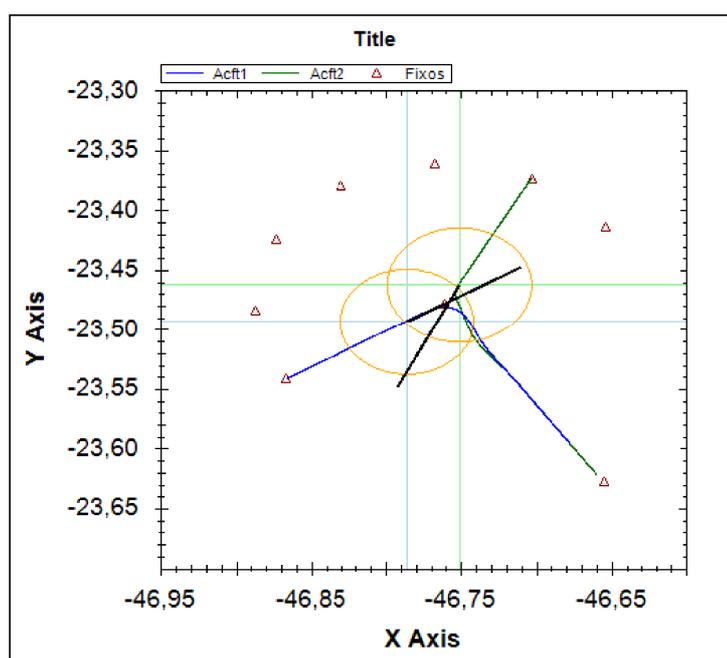


Figura 53 - Instante de detecção de Conflito.

O momento de detecção ($T_{\text{detecção}}$) pode ser obtido comparando a posição de cada uma das aeronaves com o tamanho da Zona de Alerta naquele instante. Vale lembrar que a Zona de Alerta é medida, horizontalmente, em tempo de separação, e por isso, ela varia com a velocidade, segundo a expressão:

$$Raio_{TA} = 40s * velocidade$$

Assim, o $T_{\text{detecção}}$ é obtido quando:

$$distância\ horizontal(aeronave_a, aeronave_b) \leq Max(Raio_{TA}(aeronave_a), Raio_{TA}(aeronave_b))$$

$$e\ |altitude_a - altitude_b| \leq 850ft$$

Analogamente, o instante de conflito (T_{conflito}) é definido como o momento no qual ocorre a presença de uma aeronave dentro da Zona de Proteção da outra. Sendo:

$$Raio_{RA} = 20s * velocidade$$

Assim, o T_{conflito} é obtido quando:

$$distância\ horizontal(aeronave_a, aeronave_b) \leq Max(Raio_{RA}(aeronave_a), Raio_{RA}(aeronave_b))$$

$$e\ |altitude_a - altitude_b| \leq 600ft$$

Um dos problemas que podem ocorrer na combinação das trajetórias é o início do voo já em condições de conflito. Esta situação representa um truncamento da amostra, e por isso não deve ser considerada para os cálculos subsequentes. Neste ponto é possível detectar e remover estas amostras, observando se a seguinte identidade é verdadeira:

$$T_{\text{detecção}} - T_0 = 0$$

Da mesma forma, podem ser geradas amostras nas quais T_{Conflito} é igual a T_0 , sendo estas amostras removidas se:

$$T_{\text{conflito}} - T_0 = 0$$

Com a massa de dados filtrada, pode-se calcular para cada voo o *Tempo Máximo de Reação* ($\Delta T_{\text{Max_Reação}}$) que o controlador tem para comunicar o piloto e evitar a ocorrência do conflito, sendo:

$$\Delta T_{\text{Max Reação}} = T_{\text{conflito}} - T_{\text{detecção}}$$

5.6.3 Análise da Trajetórias - Taxa de Aproximações Inseguras (λ_{App})

A partir da obtenção dos tempos de detecção e conflito, pode-se avaliar se a aproximação quase simultânea é segura ou não. Define-se a aproximação como funcional (não falha) caso não ocorra conflito durante o tempo simulado, ou seja, as aeronaves iniciaram o procedimento suficientemente espaçadas para que não ocorresse perda de separação ao longo de toda a trajetória.

Porém, podem ocorrer falhas na aproximação. Estas falhas podem ser divididas em *falhas seguras* e *falhas inseguras* (ou *aproximação insegura*). As falhas seguras são aquelas na qual ocorre a detecção (invasão da zona de alerta) mas o conflito não chega a ocorrer. As falhas inseguras são aquelas nas quais ocorre a detecção e o conflito em si (invasão da zona de proteção) durante a simulação.

As falhas inseguras representam a *Taxa de Aproximações Inseguras* (λ_{App}) do cenário. Esta taxa varia com a demanda, pois com as aeronaves voando mais próximas, de forma a cumprir um menor intervalo entre os pousos, tem-se uma probabilidade maior da ocorrência de aproximações inseguras. Assim, o λ_{App} é definido como:

$$\lambda_{App} = \frac{\text{falhas inseguras na aproximação}}{\text{total de aproximações}}$$

5.6.4 Cálculo da Probabilidade de Colisão ($P_{colisão}$)

Por fim, dada a situação de conflito, há uma probabilidade de que as aeronaves colidam. Esta probabilidade é apresentada em (EUROCONTROL; FAA, 1998) e pode ser calculada como:

$$P(\text{aeronave}_a, \text{aeronave}_b) = \frac{2nR\sqrt{v_a^2 - 2v_a v_b \cos(\theta) + v_b^2}}{v_a^2 v_b^2 \text{sen}(\theta)} \quad (1)$$

onde:

- v_a é a velocidade da aeronave A [kt];
- v_b é a velocidade da aeronave B [kt];
- n é a demanda do espaço aéreo [pousos/h];
- θ é o ângulo de convergência [graus]; e
- R é o raio da aeronave [nm].

Assim, a Probabilidade de Colisão ($P_{colisão}$) no cenário é obtida da média das probabilidades de colisão para cada voo da massa de dados:

$$P_{Colisão} = \frac{\sum P(\text{aeronave}_a, \text{aeronave}_b)}{\text{aproximações totais}}$$

5.7 ETAPA 4 – SIMULAÇÃO DA REDE

Com os dados dos voos analisados, pode-se realizar na etapa 4 a análise da rede de comunicações. Nesta etapa, o envio de pacotes na camada CPDLC é simulado, utilizando-se as interfaces do controlador e piloto para a geração de mensagens e o modelo estatístico da camada de rede para a determinação do tempo de transmissão. Assim, a simulação torna-se independente do protocolo de comunicação utilizado na implementação física.

O $\Delta T_{\text{comunicação}}$ pode ser definido como o tempo total que o controlador leva para reagir (formular a mensagem), ocorrer a transmissão na rede e o piloto reagir (interpretar a mensagem e atualizar o plano de voo). Este tempo pode ser definido como:

$$\Delta T_{\text{comunicação}} = \Delta T_{\text{final}} = T_{\text{final}} - T_{\text{detecção}}$$

Subtraindo-se os tempos de reação do controlador e do piloto (reação e manobra), tem-se o tempo de transmissão da mensagem na rede:

$$\Delta T_{\text{transmissão}} = \Delta T_{\text{comunicação}} - T_{\text{Reação ATC}} - T_{\text{Reação Piloto}} - T_{\text{Manobra}}$$

Porém o $\Delta t_{\text{transmissão}}$ não é simplesmente o tempo de transmissão de uma mensagem na rede de comunicação. O número de mensagens na camada de física da rede deve ser medido e o $\Delta t_{\text{transmissão}}$ deve contabilizar todas estas trocas.

O simulador CPDLC utilizado foi desenvolvido nesta pesquisa e integrando à plataforma Pipe-SEC. Neste procedimento de referência pode ser simulado a troca de mensagens CPDLC com o intuito de se evitar o conflito. Assim, para o procedimento de referência as mensagens de alteração de proa, velocidade e altitude foram enviadas.

A partir do conjunto de mensagens, a sequencia de mensagens entre piloto e controlador é trocada por meio da interface gráfica que implementa o protocolo CPDLC. Por meio da execução da máquina de estados, são obtidas as mensagens na camada DS e, por fim, na camada de transporte da ATN.

Com relação à rede, as camadas CPDLC e DS são modeladas de acordo com a especificação OACI e foram simuladas na íntegra. As camadas inferiores, de transporte, rede e enlace, são modeladas como distribuições normais truncadas, pois sua composição depende da implementação da ATN que não faz parte do escopo da pesquisa.

5.7.1 Taxa de Falhas da Rede (λ_{Rede})

A falha da rede é dada pelo *tempo de transmissão da mensagem* ser maior do que o *tempo máximo de reação*. Desta forma, essa falha representa o não cumprimento do requisito temporal por parte da rede, ou seja, desempenho. Neste sentido, essa pesquisa considera uma disponibilidade total da rede de comunicação. Assim, para cada voo simulado, pode-se calcular a probabilidade de uma rede ser eficiente ou falhar contando-se os casos onde:

$$\Delta T_{\text{comunicação}} > \Delta T_{\text{Max Reação}}$$

Com estas duas informações, para cada cenário, pode-se calcular qual é a *taxa de conflitos*, ou seja, qual é a probabilidade de T_{final} exceder o T_{conflito} . A partir do conjunto de *tempos máximos de reação*, pode-se medir a *taxa média de falhas da rede*. Modelando-se a rede por uma distribuição de probabilidade de tempos de transmissão, pode-se calcular a taxa de falhas como 1 menos a probabilidade da mensagem chegar até o instante máximo de reação. Assim, a $P_{\text{rede Falhar}}$ será medida como a integral da função densidade de probabilidade dos tempos de transmissão no intervalo de $\Delta T_{\text{max_Reação}}$ a $+\infty$. A área hachurada da Figura 54. representa o $P_{\text{Rede Falhar}}$ calculada.

Portanto, para um dado cenário de demanda, a λ_{Rede} será calculada como a média da $P_{\text{Rede Falhar}}$.

$$\lambda_{\text{Rede}} = \frac{\sum P_{\text{Rede Falhar}}}{\text{aproximações inseguras}}$$

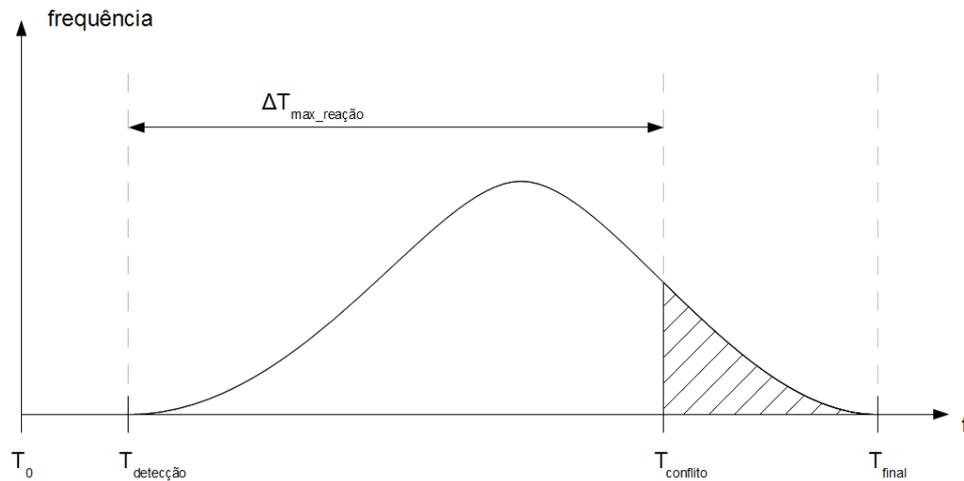


Figura 54 - Taxa de falha da rede.

5.8 ETAPA 5 – ANÁLISE DE SEGURANÇA

Por fim, tem-se a etapa de análise de segurança do sistema. Nesta etapa os parâmetros calculados e medidos nas etapas anteriores são inseridos no modelo de Markov que representa o sistema.

5.8.1 Modelo de Markov do Sistema

O modelo de Markov é representado por um grafo onde os nós são os estados nos quais o sistema pode estar em um determinado instante de tempo e as arestas representam transição entre estados.

Para o procedimento de referência, criou-se o modelo apresentado na Figura 55.

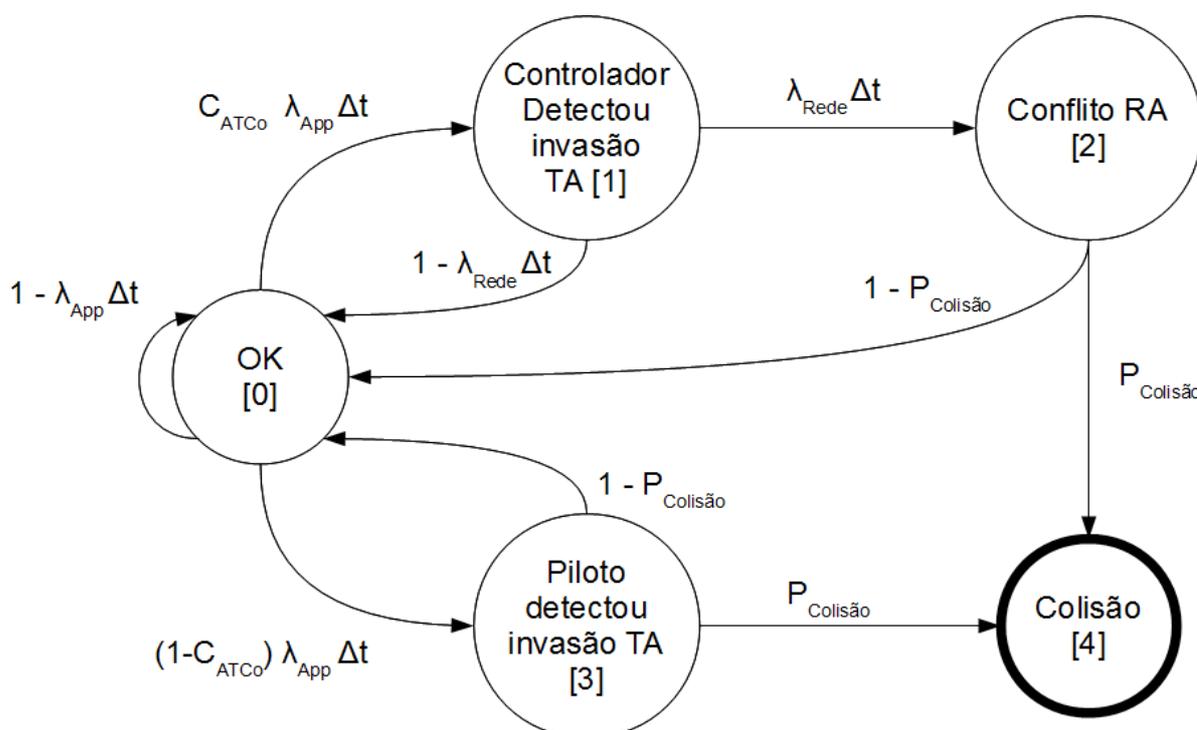


Figura 55 - Modelo de Markov do sistema.

O estado [0] é a situação na qual o sistema está funcionando corretamente, sem a ocorrência de aproximações inseguras. Este é o estado inicial do sistema.

Caso o par de aeronaves execute uma aproximação insegura, ocorre a transição para o estado [1], que representa a detecção do conflito por parte do controlador, ou para o estado [3], que representa a detecção do conflito por parte do piloto. A probabilidade da transição ocorrer para o estado [1] é dada pela cobertura do controlador, sendo a transição para o estado [3] complementar.

Dado a detecção do conflito pelo controlador, este pode enviar mensagens que mitigam a ocorrência do conflito. Porém, a efetividade destas mensagens dependem da taxa de falhas da rede (λ_{Rede}). Caso a rede seja efetiva em seu desempenho, o sistema retorna para o estado [0]. Caso a rede falhe em seu desempenho, ocorre o conflito e a transição para o estado [2].

Para o caso da detecção da falha insegura por parte do piloto, estado [3], não há influência da rede, pois este pode tomar as medidas necessárias sem o auxílio do controlador.

Com o sistema nos estados [2] ou [3], há a ocorrência do conflito. Contudo, o conflito não representa a colisão de fato. A probabilidade de colisão é modelada por $P_{\text{colisão}}$ e causa a transição para o estado de acidente, representado pelo estado [4].

Considera-se o sistema inseguro a probabilidade deste estar no estado [4] após um intervalo de tempo t , dado que estava seguro no instante inicial. Assim, a função segurança do sistema $s(t)$ pode ser medida como:

$$s(t) = P_4(t)$$

Esta probabilidade pode ser calculada a partir do modelo de Markov, no qual a probabilidade o sistema estar em um dos seus estados é dada pela equação:

$$\begin{bmatrix} P_0(t + \Delta t) \\ P_1(t + \Delta t) \\ P_2(t + \Delta t) \\ P_3(t + \Delta t) \\ P_4(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_{App} \Delta t & 1 - \lambda_{Rede} \Delta t & 1 - P_{Colisão} & 1 - P_{Colisão} & 0 \\ C_{ATCo} \lambda_{App} \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{Rede} \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ (1 - C_{ATCo}) \lambda_{App} \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{Colisão} & P_{Colisão} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_0(t) \\ P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ P_4(t) \end{bmatrix}$$

Assim, calculando-se este sistema para cada intervalo de tempo (Δt) obtém-se a função $s(t)$.

5.9 DADOS DE SAÍDA DO PROCESSO

5.9.1 Nível de Segurança (TLS)

O nível de segurança adotado é o inverso da *taxa de falhas inseguras do sistema*. A OACI define como aceitável a taxa de 5×10^{-9} acidentes por hora (ICAO, 1988). Como cada colisão, no caso de colisão em pleno voo, contabiliza dois acidentes, tem-se a taxa máxima de $2,5 \times 10^{-9}$ colisões/hora. O nível de segurança é o inverso da taxa de falhas inseguras do sistema, podendo ser chamado de *Mean Time to Unsafe Failures* (MTTUF):

$$MTTUF \geq \frac{1}{2,5 * 10^{-9}} = 4 * 10^8 \text{ horas}$$

Este nível de segurança é medido para cada demanda e tipo de rede simuladas e é obtido a partir do modelo de Markov.

5.10 HIPÓTESES E SIMPLIFICAÇÕES DO MODELO

Não serão consideradas variações meteorológicas ao longo do tempo de simulação física. Esta restrição não afeta os resultados uma vez que o computador de bordo compensa pequenas variações no vento (SAGER, 1973). Além disso, em situações extremas, as aeronaves adotam procedimentos adicionais ou são desviadas para outros aeródromos (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2009b).

Será considerado apenas um controlador no trecho da TMA. Em Terminais complexas, como a TMA-SP, existe mais de um controlador atuando na região, cada qual no seu respectivo setor. A simulação abrange apenas o que seria definido como um setor, não sendo necessário considerar outros controladores adjacentes. Além

disso, a consideração desta troca, chamada de *hand-off*, acarretaria um aumento significativo no tempo de troca de mensagens devido ao procedimento de *hand-off* em si, e não devido à manobra ou à rede.

O tempo de resposta do piloto automático e do controlador serão fixados para que não interfiram nos resultados. A reação do controlador consiste no tempo que ele leva para, a partir da detecção do conflito, realizar todos os passos para enviar a mensagem CPDLC. Já para o piloto, o tempo de reação é o tempo para ele perceber que a mensagem chegou, enviar o ACK e alterar o curso da aeronave. Nesta pesquisa está sendo adotado o tempo de 3 segundos para cada uma destas reações (EYFERTH ET AL., 2003) e de 10 segundos para o tempo da manobra (FAA, 2008).

As aeronaves serão pilotadas pelo piloto automático. Atualmente, grande parte das manobras já é realizada desta forma, na qual o piloto apenas altera o *set point* do computador de bordo e o supervisiona. Com a introdução de VANTs, esta técnica será sempre utilizada (TADEMA; THEUNISSEN, 2007). Esta hipótese auxilia a execução da simulação em tempo acelerado, pois assim não há necessidade de interação com operador humano.

Assume-se que as aeronaves, na condição inicial do cenário, não estão em situação de conflito. Porém, essas poderão entrar em conflito durante a evolução da simulação física. Esta premissa foi fixada para que o desempenho, do CPDLC em uma condição extrema, possa ser avaliado.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a execução da metodologia desenvolvida nesta pesquisa e descrita no capítulo anterior. Os resultados foram avaliados etapa por etapa e, em alguns casos, uma análise da sensibilidade do parâmetro foi apresentada.

Na primeira etapa, foram selecionados 28 trajetórias de aproximação e 5 valores de demanda do espaço aéreo. A partir destes dados, foram gravadas as trajetórias utilizando o simulador voo FSX utilizando-se a Pipe-SEC. De posse dos dados temporais de cada voo, estes foram combinados dois a dois para formarem pares de aproximação. Para cada demanda do espaço aéreo, foram gerados 100.000 pares de aproximação, totalizando 500.000 de amostras.

Foram então computados, para os diferentes valores de demanda e tipos de rede, os tempos máximos de reação do controlador ($\Delta t_{\text{Max_Reac}}$), a taxa de aproximações inseguras (λ_{App}), a taxa de falhas da rede (λ_{Rede}), a cobertura do ATCo (C_{ATCo}) e a probabilidade de colisão ($P_{\text{Colisão}}$).

Estes parâmetros foram inseridos no modelo de Markov para o levantamento da curva de segurança de cada sistema (demanda, tipo de rede), e o cálculo do MTTUF. Estes valores foram então comparados com o nível de segurança estabelecido pela OACI, de forma que foi possível comparar os valores experimentais com o TLS desejado.

6.1 ETAPA 1 – DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

6.1.1 Seleção das Trajetórias de Voo

Nesta primeira etapa, foram selecionados os valores para os parâmetros que definem as características de aproximação das aeronaves. Conforme apresentado no capítulo anterior, o cenário de referência é o procedimento de aproximação para a pista 17R de Congonhas. A partir deste procedimento, foram geradas variações angulares e de velocidade visando a gravação da dinâmica de voo para diferentes demandas do espaço aéreo.

Analisando-se o procedimento de referência, observou-se que este tem um limite máximo de velocidade de 190kt, porém não possui um limite mínimo. Assim, estabeleceu-se o valor mínimo de velocidade correspondente ao valor mínimo aceitável da velocidade da aeronave para este tipo de pouso.

A aeronave utilizada nas simulações foi o Boeing 737-800, configurada para estar no fixo de entrada com 10% do combustível máximo e *flaps* a 25 graus, representando a situação usual de pouso. Esta aeronave foi escolhida por ser uma das mais utilizadas na TMA-SP para voos comerciais domésticos. Nesta configuração, a velocidade mínima da aeronave é de 130kt. Dessa forma, as velocidades escolhidas foram selecionadas de 130kt a 190kt com incrementos de 20kt.

A proa de saída desejada é de 167 graus, correspondente à do procedimento de referência. Como deseja-se observar as diferenças entre a proa de saída e de entrada entre -90° e $+90^\circ$. Foram selecionados 7 valores de proa de entrada, entre 77° e 257° , separados de 30 graus em relação ao ponto de convergência, pois este número já permite uma variação significativa de cenários e condiz com a separação das rotas no procedimento de referência.

A partir das proas, definem-se os fixos FE_n (com n de 0 a 6), apresentados na Figura 56, onde pode-se ver o cenário base. As distâncias entre os fixos de entrada e EVER, e entre EVER e o aeroporto foram adotadas em 7nm e 10nm, correspondentes ao procedimento de referência.

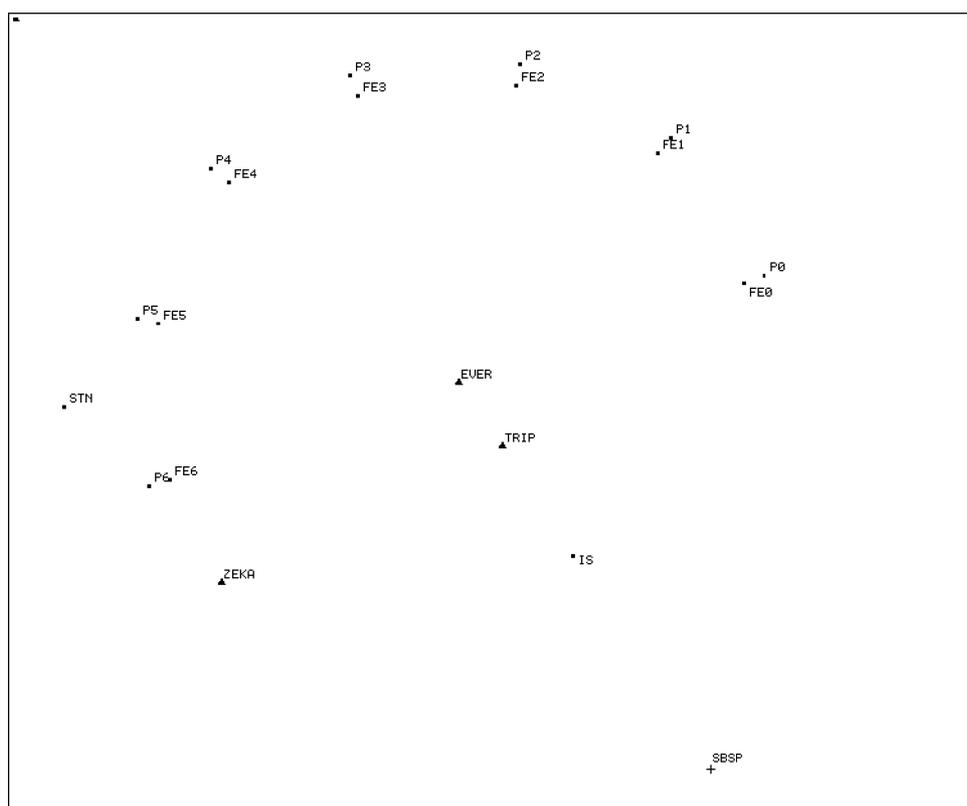


Figura 56 - Mapa do Cenário Base.

Combinando-se proa e velocidade iniciais, tem-se o conjunto de trajetórias simuladas. A Tabela 7 apresenta as condições iniciais para as 28 trajetórias.

Tabela 7 - Condições iniciais.

Fixo de Entrada	Proa de Entrada	Velocidade Inicial [kt]			
		130	150	170	190
FE0	257°	Voo 1	Voo 8	Voo 15	Voo 22
FE1	227°	Voo 2	Voo 9	Voo 16	Voo 23
FE2	197°	Voo 3	Voo 10	Voo 17	Voo 24
FE3	167°	Voo 4	Voo 11	Voo 18	Voo 25
FE4	137°	Voo 5	Voo 12	Voo 19	Voo 26
FE5	107°	Voo 6	Voo 13	Voo 20	Voo 27
FE6	77°	Voo 7	Voo 14	Voo 21	Voo 28

6.1.2 Seleção da Demanda do Espaço Aéreo

Com relação à demanda do espaço aéreo, utilizou-se a métrica de pousos de aeronaves por hora. O aeroporto de referência, Congonhas, possui 19 movimentos por hora no seu horário de pico. Isto representa uma defasagem média de 1'52" entre pousos, ou entre pousos e decolagens. Para se considerar o pior caso, nesta pesquisa utilizou-se o valor de 20 pousos por hora como demanda de referência. A partir deste valor, foram então selecionadas 5 demandas distintas, representando 15, 20, 30, 60 e 90 pousos por hora.

6.2 ETAPA 2 – SIMULAÇÃO FÍSICA

Nesta etapa foi realizada a gravação da trajetória física da aeronave para os diversos voos definidos na etapa anterior. Para isso, as condições iniciais foram configuradas no FSX e cada trajetória foi armazenada utilizando-se o módulo *FSX Recorder* da Pipe-SEC.

Os dados capturados foram então observados no visualizador de voos do simulador CPDLC. A Figura 57 apresenta a visualização do voo número 7. Nesta figura pode-se observar no lado esquerdo o plano horizontal da trajetória descrita pela aeronave e no canto superior direito o perfil vertical. Esta visualização permitiu a eliminação de voos com erros na simulação da trajetória.

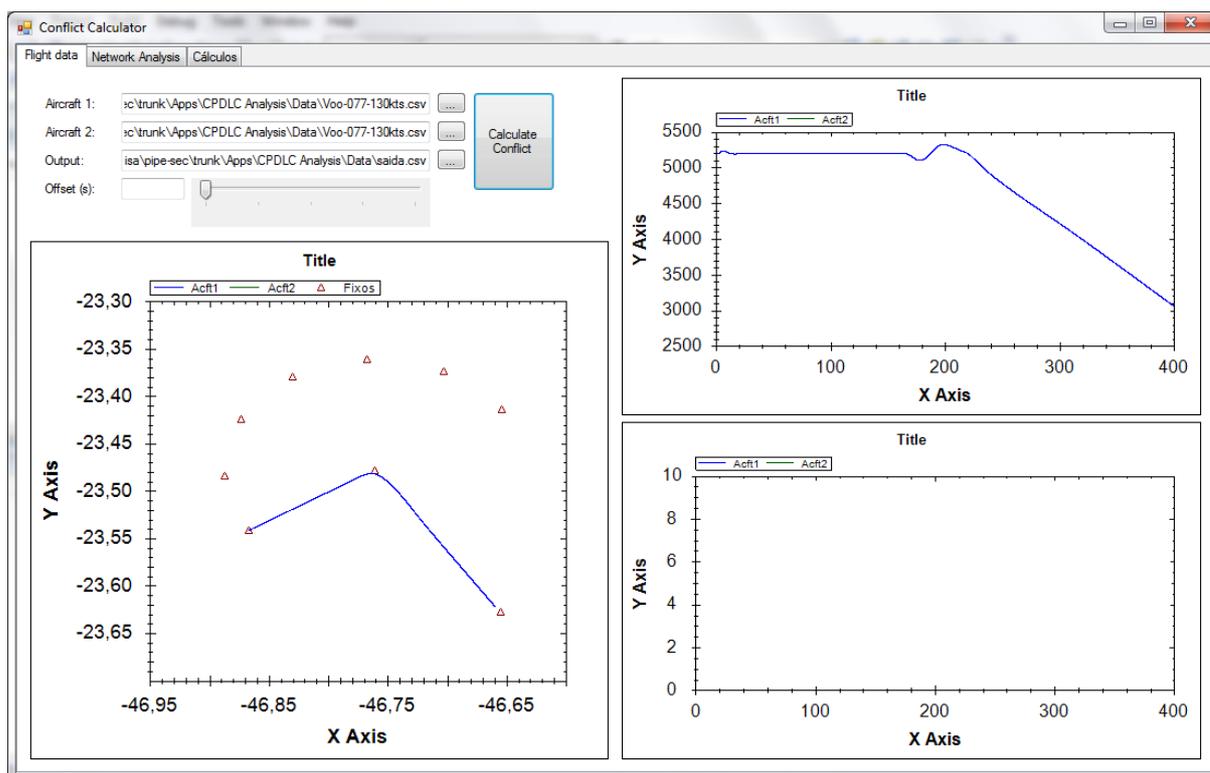


Figura 57 - Visualização do Voo 7.

6.2.1 Geração da Massa de Dados

Após a obtenção das trajetórias de voo, os cenários de demanda do espaço aéreo puderam ser obtidos, combinando-se um par de trajetórias e estabelecendo-se diferentes defasagens de tempo, sorteadas entre 0 e o intervalo de tempo mínimo para cada valor de pousos por hora.

Para cada demanda do espaço aéreo (pousos por hora) gerou-se 100.000 pares de aproximações quase simultâneas de duas aeronaves, totalizando 1 milhão de aproximações. Os resultados obtidos por meio dessas simulações representam a massa de dados final que foi considerada para a obtenção dos resultados a seguir.

6.3 ETAPA 3 – ANÁLISE DE VOO

6.3.1 Cálculo da Taxa de Aproximações Inseguras (λ_{App})

Houve casos nos quais a invasão da zona de alerta não gerou uma invasão na zona de proteção. Esta situação foi batizada como *falha segura*. Outra situação ocorrida corresponde a uma invasão na zona de alerta gerando uma invasão na zona de proteção. Esta situação foi batizada de *falha insegura*, pois há tempo do controlador reagir a fim de evitar a situação de risco.

A Figura 58 apresenta a distribuição dos tipos de falha para cada demanda simulada. Pode-se perceber que com o aumento do número de pousos por hora, aumenta a quantidade de *falhas inseguras*. A porcentagem de *falhas inseguras* foi então armazenada como λ_{App} e usada posteriormente no modelo de Markov.

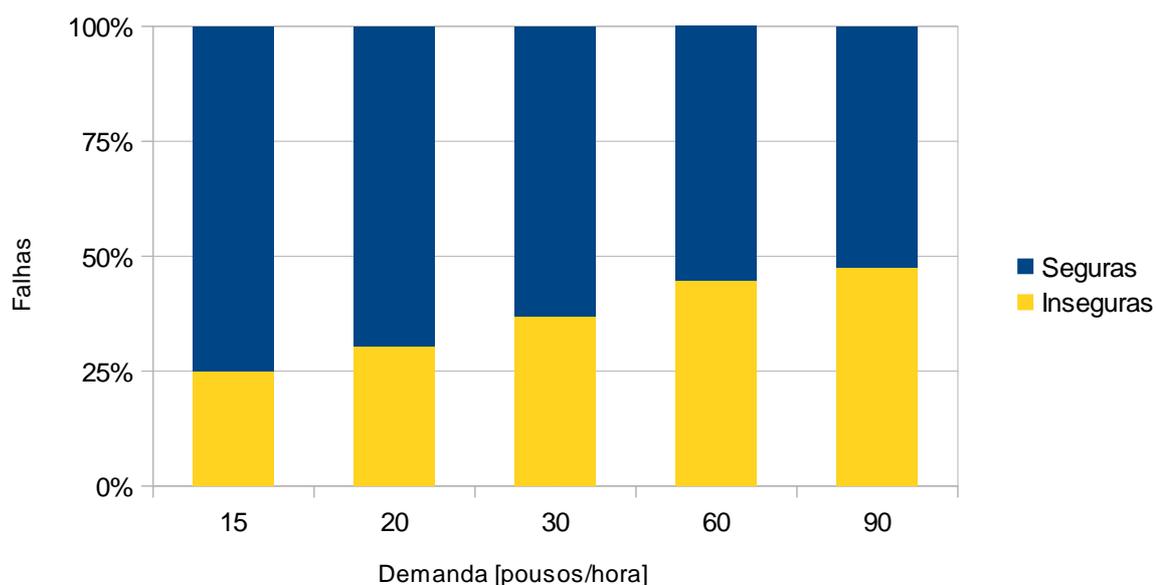


Figura 58 - Distribuição dos tipos de falha para cada demanda.

6.3.2 Cálculo do Tempo Máximo de Reação ($\Delta t_{\text{Max_Reac}}$)

De posse das aproximações inseguras geradas na etapa anterior, para cada par de aproximações foi calculado o tempo máximo de reação ($\Delta t_{\text{Max_Reac}}$) que o controlador de tráfego aéreo tem para atuar a fim de evitar a perda de separação (conflito) que pode levar posteriormente a uma colisão. Estes dados foram armazenados em uma lista para cada demanda do espaço aéreo de forma independente.

A Figura 59 apresenta a distribuição dos $\Delta t_{\text{Max_Reac}}$ obtidos para a demanda de 20 pousos/hora. Nesta situação, o intervalo médio de pouso entre aeronaves é de 3 minutos. A distribuição mostra uma grande concentração ao redor de 35s e uma longa cauda estendendo-se até 290s.

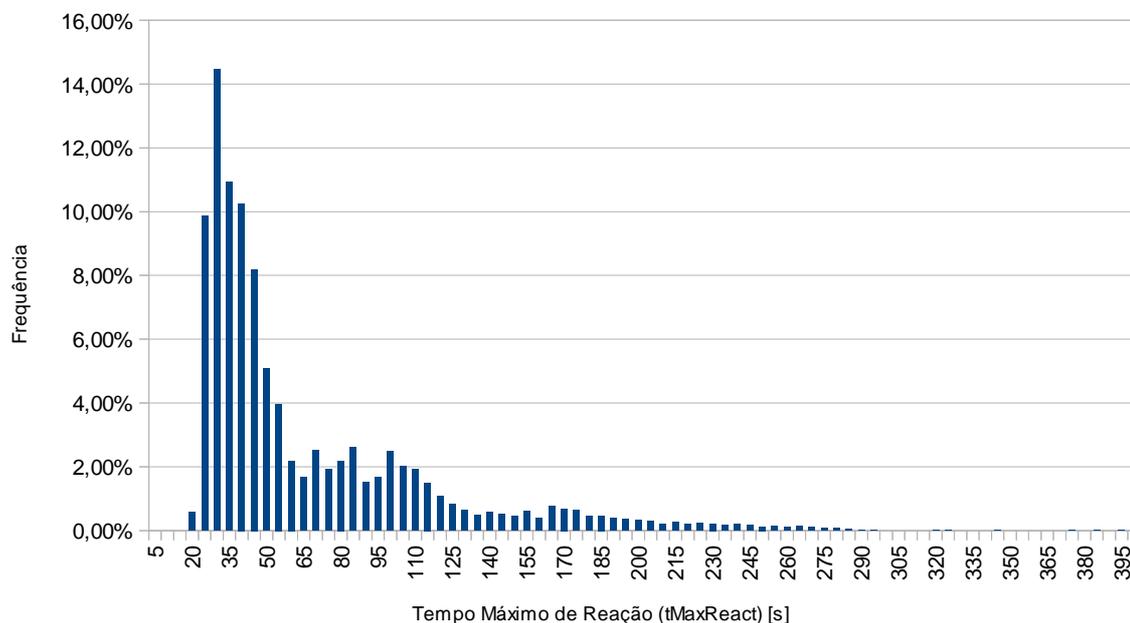


Figura 59 - Distribuição do Tempo máximo de reação para 20 pousos/h.

No outro extremo, a Figura 60 apresenta o histograma para 90 pousos/h. Nota-se que a concentração permanece ao redor de 35s, porém praticamente não há tempos de reação maiores do que 160s.

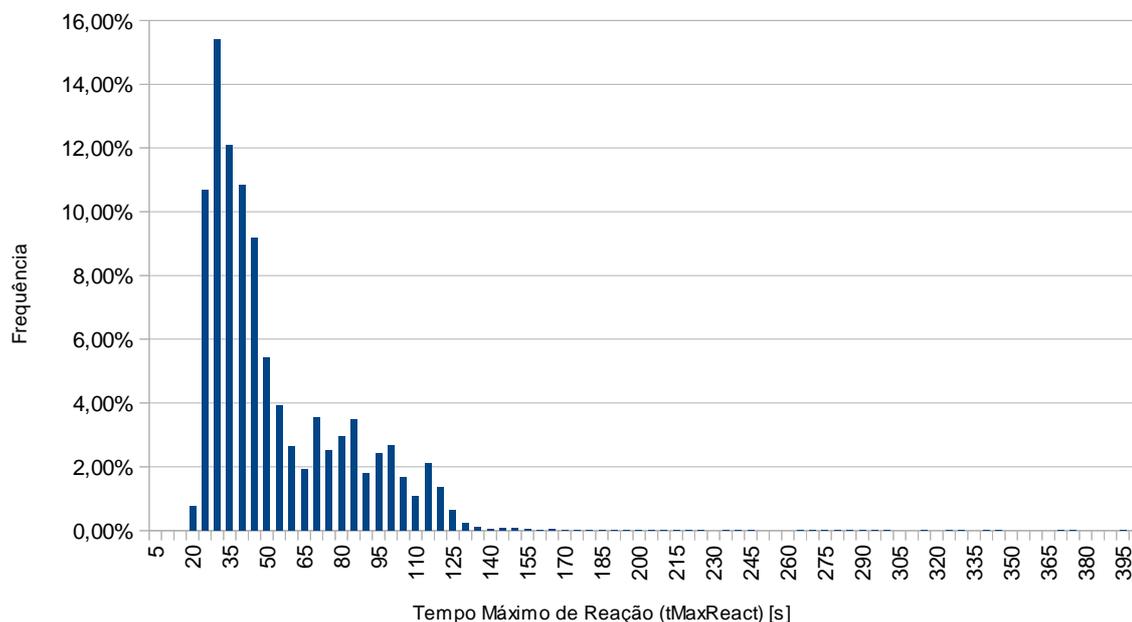


Figura 60 - Distribuição do Tempo máximo de reação para 90 pousos/h.

6.3.3 Cálculo da Probabilidade de Colisão ($P_{\text{Colisão}}$)

A probabilidade de colisão entre duas aeronaves é dada pela Equação 1, apresentada no Capítulo 5. Para cada cenário foi calculada a probabilidade média de colisão dentre as aproximações simuladas, levando-se em consideração as variações de proa, velocidade e demanda.

A Figura 61 apresenta a variação da probabilidade de colisão em função da demanda do espaço aéreo. Pode-se observar que a $P_{\text{Colisão}}$ é diretamente proporcional ao número de pousos por hora. Isto é explicado pelo fato de que este número é um parâmetro da equação.

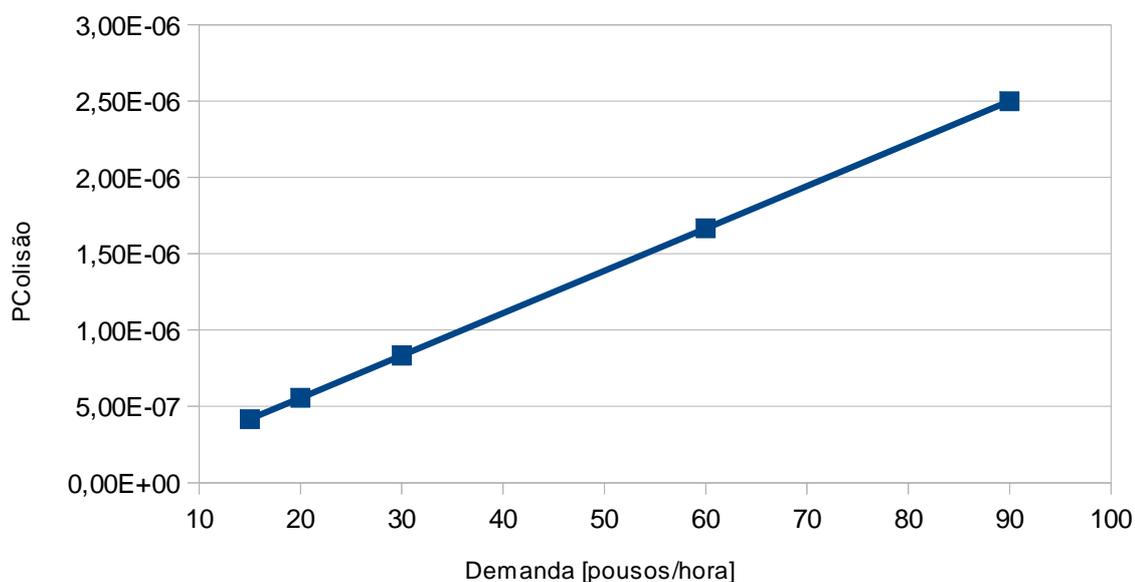


Figura 61 - Probabilidade de Colisão em função da demanda.

6.4 ETAPA 4 – ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DA REDE

6.4.1 Seleção dos Tipos de Rede

A partir da distribuição de tempos máximos de reação ($\Delta t_{\text{Max_Reac}}$), foram calculadas as taxas de falha (λ_{Rede}) de cada tipo de rede e para cada demanda. As redes escolhidas para a pesquisa são baseadas nas categorias ATSC definidas pela OACI. Para efeito de comparação, utilizou-se a característica da comunicação por voz extraída de (LOZITO ET AL., 2003) que estabelece o tempo gasto para uma transação de voz entre o ATCo e o Piloto como $N(12.88 ; 4.95)$. Para representar os enlaces de dados usados no CPDLC, foram escolhidas as categorias B, C e D da OACI. A categoria D é a escolhida pela FAA como padrão para voos em rota e a categoria C para voos em área terminal. A Tabela 8 apresenta o resumo das características das redes escolhidas.

Tabela 8 - Redes de comunicação simuladas.

Nome Adotado	Média	Desvio Padrão	Classe ATSC	Uso FAA
B	2,9	1,27	B	-
C	5	1,82	C	Terminal
D	10	3,04	D	Rota
Voz	12,88	4,95	-	Ambos

6.4.2 Cálculo da Taxa de Falhas da Rede (λ_{Rede})

Para as redes escolhidas, pode-se observar na Figura 62 que a *taxa de falhas da rede* aumenta com o aumento do número de pousos de aeronaves. Outro comportamento interessante é o aumento da taxa de falhas em função do aumento do tempo de resposta da rede, combinação da média e desvio padrão do tempo de transmissão.

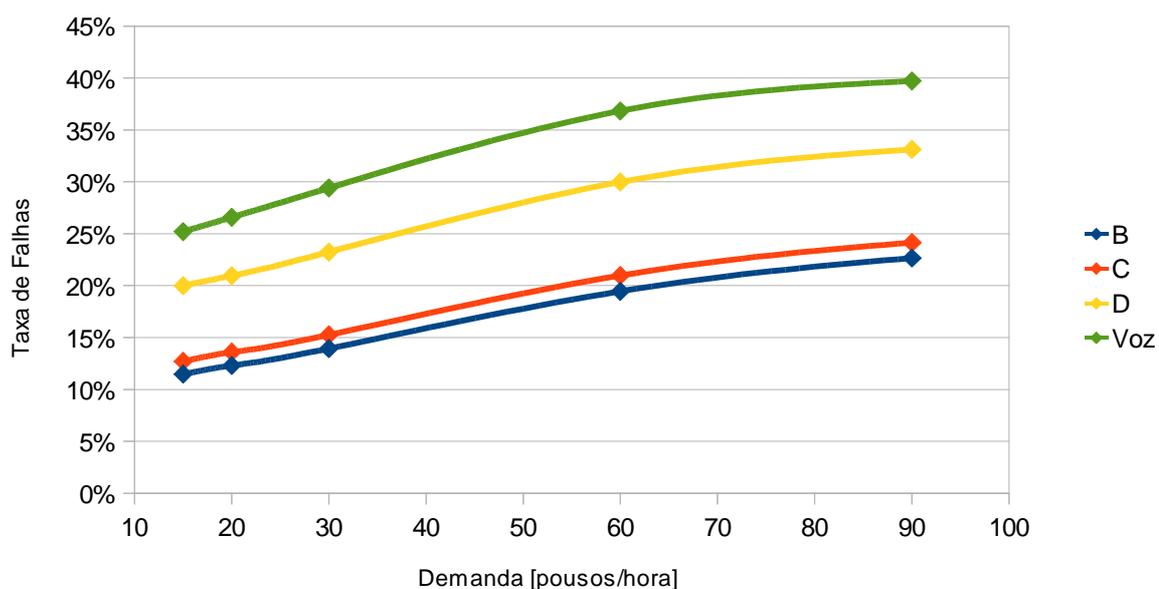


Figura 62 - Taxa de Falhas da Rede (λ_{Rede}) em função do movimento de aeronaves.

Analisando-se a sensibilidade da *taxa de falhas da rede* em função da média do tempo de transmissão, pode-se observar na Figura 63 que o aumento da média provoca um aumento significativo no aumento da taxa de falhas. Do mesmo modo, o aumento do número de aeronaves também reflete o aumento na taxa de falhas.

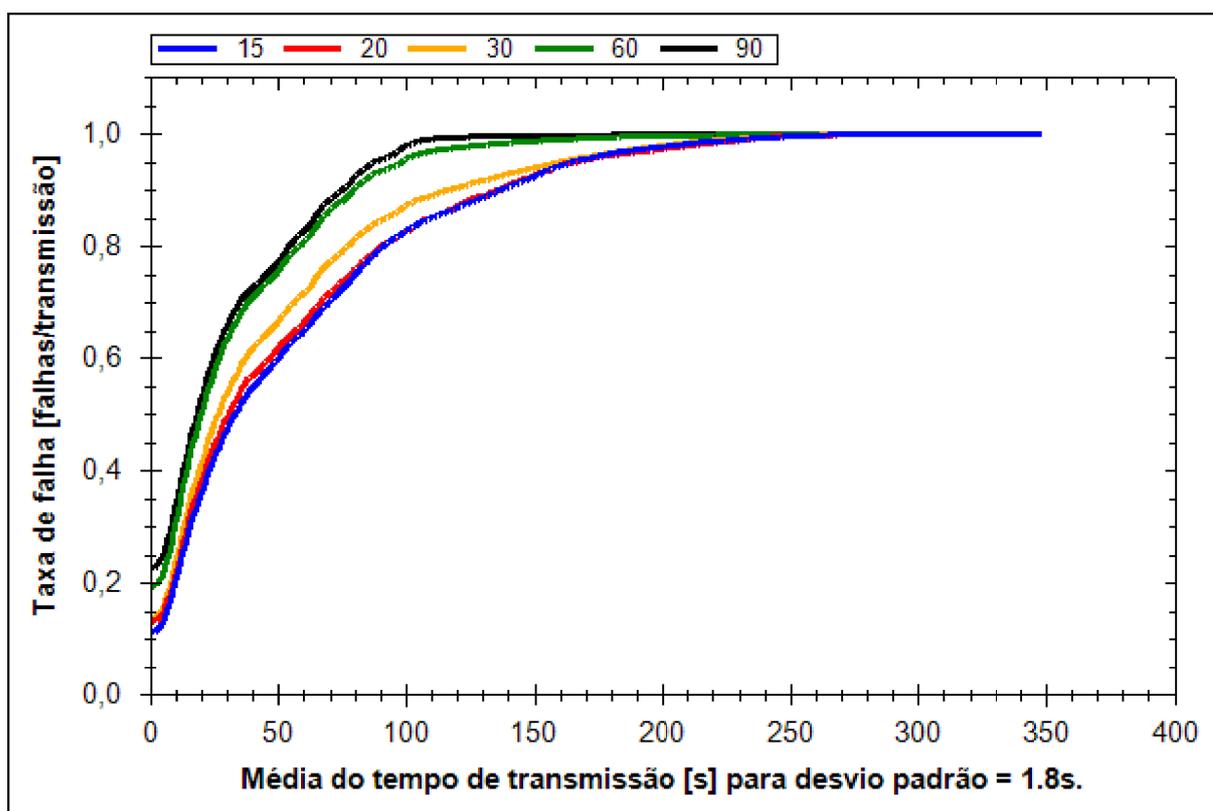


Figura 63 - Falhas da rede em função da média, para cada demanda.

Já com relação à variação do desvio padrão do tempo de transmissão não pode ser dito o mesmo. A variação da *taxa de falhas da rede* em função do desvio padrão é muito pequena, principalmente para pequenos valores de média. A Figura 64 mostra a variação do λ_{Rede} em função do desvio padrão para as diferentes demandas do espaço aéreo. Pode-se notar que há um pequeno crescimento na taxa de falhas com o aumento do desvio padrão. Da mesma forma, para um número maior de pousos, a taxa de falhas aumenta.

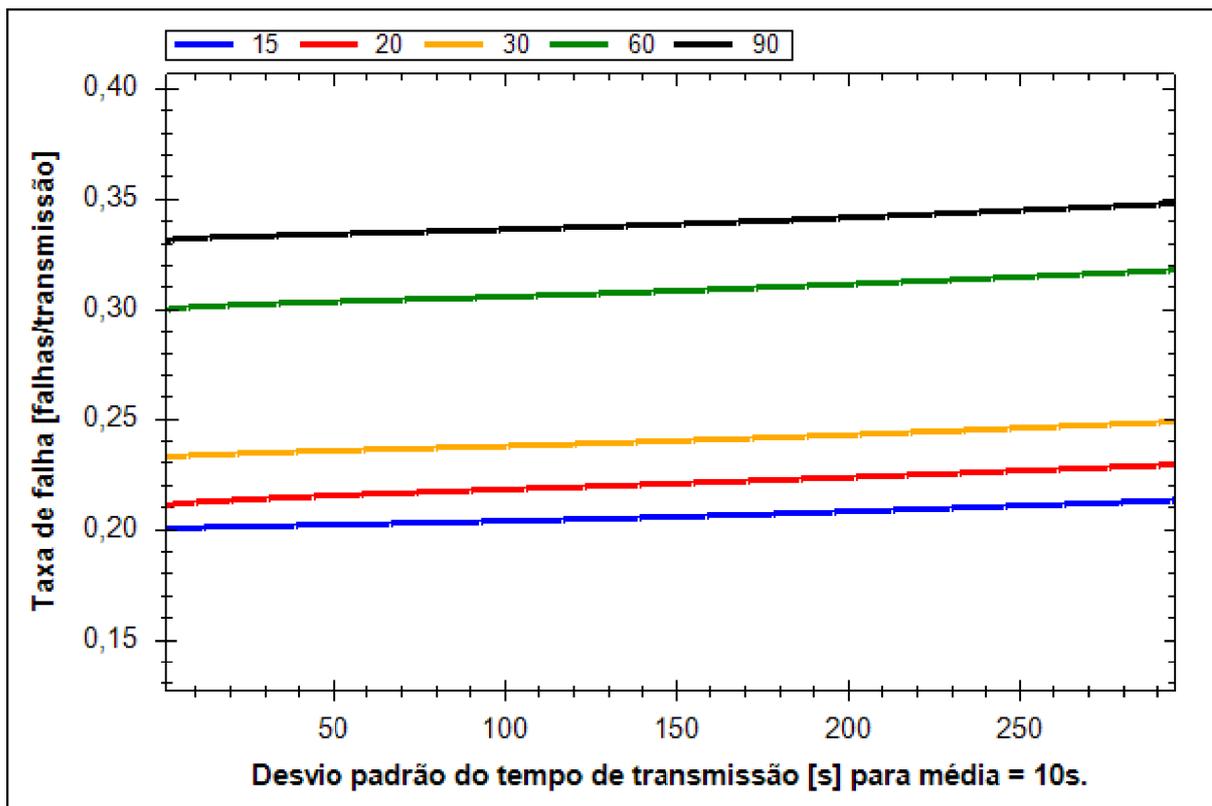


Figura 64 - Falhas da rede em função do desvio padrão, para cada demanda.

6.5 ETAPA 5 – ANÁLISE DE SEGURANÇA

6.5.1 Cálculo da Cobertura do ATCo (C_{ATCo})

Para o cálculo da cobertura do controlador (C_{ATCo}) utilizou-se a equação da disponibilidade do ATCo para se encontrar a sua cobertura. Segundo (MANNING ET AL., 2001), a porcentagem do tempo que o controlador está ocupado com a comunicação é, em média, 29% resultando em uma disponibilidade de 71%, conforme apresentado no Capítulo 5.

Uma das características desejadas no CPDLC é que este reduza o tempo que pilotos e controladores gastam com comunicação. Portanto, é esperado que esta cobertura aumente com o uso da comunicação digital. Porém, aqui foi utilizado o caso mais conservador, no qual a disponibilidade será, no mínimo, a mesma do que

a com o sistema de voz. Assim, esta disponibilidade foi assumida como constante e igual a 71%.

6.5.2 Cálculo do Nível de Segurança (TLS)

A partir das taxas e probabilidades obtidas nas etapas anteriores, foi possível calcular a função da segurança (*safety*) do espaço aéreo $S(t)$ dos cenários simulados por meio do modelo de Markov. A Figura 65 apresenta a curva para cada rede simulada no cenário de 15 pousos/h.

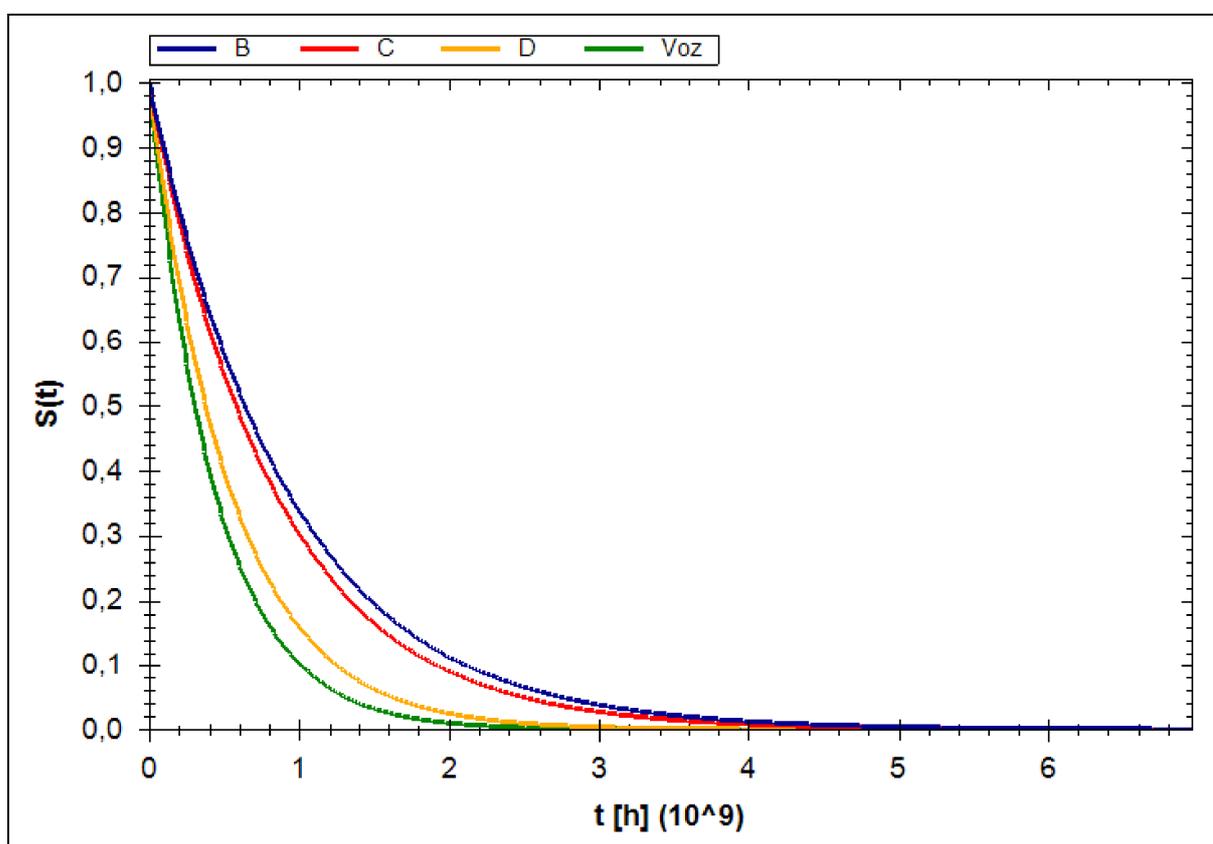


Figura 65 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 15 pousos/hora.

Comparando-se com o gráfico para o cenário de 90 pousos/h, apresentado na Figura 66, nota-se que a segurança também cai com o aumento da demanda. Fazendo com que a função $s(t)$ atinja o zero de forma mais rápida.

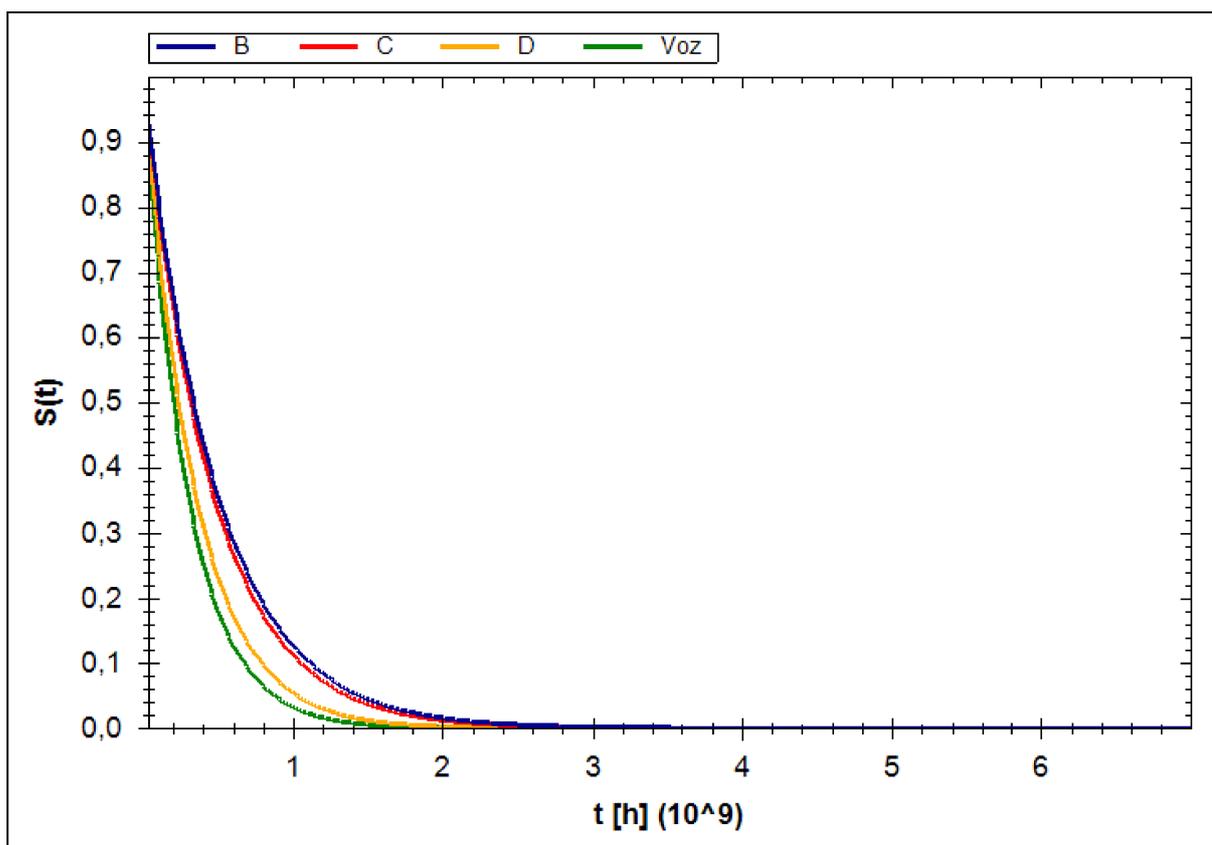


Figura 66 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 90 pousos/hora.

Cada colisão em pleno voo contabiliza dois acidentes aeronáuticos, pois duas aeronaves estão envolvidas no evento. A OACI estabelece o limite máximo de 5×10^{-9} acidentes por hora (ICAO, 1988). Assim, para atender a este critério, a taxa de colisões deve ser abaixo de $2,5 \times 10^{-9}$ colisões por hora de voo (EUROCONTROL; FAA, 1998). Isto nos leva a um MTTUF mínimo de 4×10^8 horas, sendo este o TLS adotado. Integrando-se as funções $S(t)$ obtidas, chegou-se aos valores de MTTUF para cada rede em função dos pousos por hora.

Pode-se observar na Figura 67 que a rede de voz atende ao nível de segurança nas demandas 15 e 20 pousos/h, ficando ligeiramente abaixo para 30 pousos/h. A partir desta demanda, somente as redes digitais apresentam MTTUF acima do desejado.

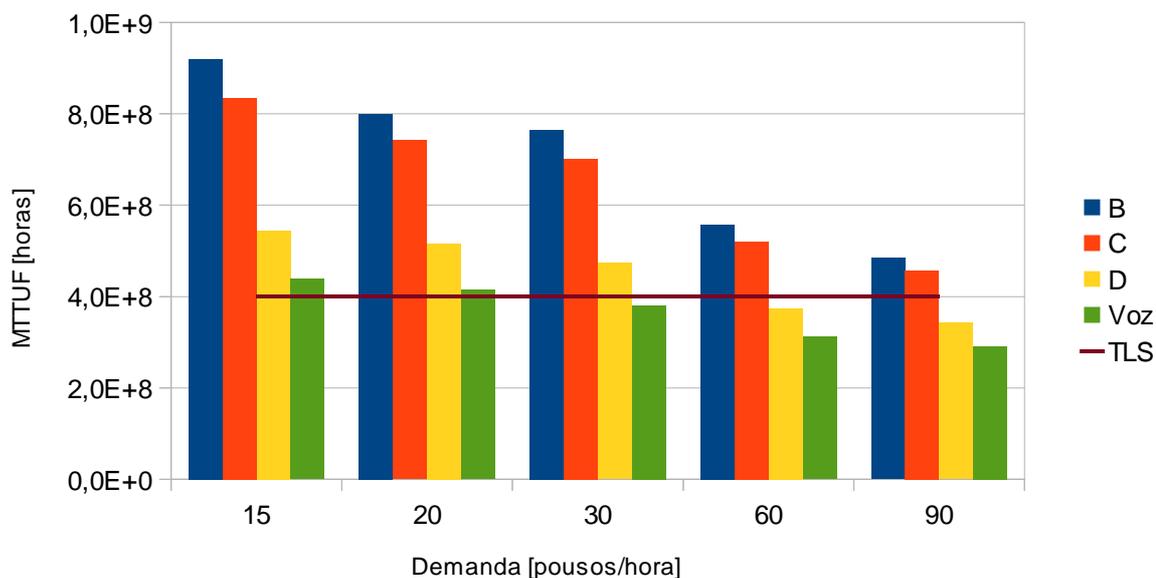


Figura 67 - MTTUF da rede em função dos movimentos.

A rede digital D, adotada pela FAA para voos em rota, atendeu os requisitos apenas até 30 pousos/h, ficando abaixo do esperado para as demandas maiores. Apesar de ter sido escolhida para voos em rota, esta poderia ser aplicada em situações de baixa demanda.

Pode-se observar ainda, que a comunicação por voz possui menor sensibilidade do que as redes digitais B, C e D. O aumento da demanda afetou significativamente o desempenho das redes digitais, entretanto, a comparação com a voz teve uma redução menor. Pode-se explicar esta baixa sensibilidade pelo fato de que as demandas simuladas estão perto ou além do limite da voz. Além disso, estas mesmas demandas, nos seus valores mais baixos (15 a 30), representam uma região na qual as redes digitais podem ser consideradas super-dimensionadas.

Com um desempenho melhor, a rede digital C, adotada pela FAA para voos em Áreas Terminais, atendeu aos níveis de segurança para todas as demandas simuladas. Pode-se então confirmar a sua aplicação para a Terminal avaliada.

A rede B, mais rápida dentre as utilizadas na pesquisa, apresentou um desempenho ligeiramente superior à rede C em todos os casos, atendendo também completamente os níveis de segurança.

Avaliando-se as redes para a demanda atual do aeroporto de Congonhas, de 20 pousos por hora, nota-se que a comunicação por voz encontra-se no limite do aceitável, enquanto que a totalidade das redes digitais apresentaram um desempenho superior ao TLS.

7 CONCLUSÃO

O sistema de transporte aéreo está sofrendo uma evolução tecnológica com a introdução do paradigma CNS/ATM. Além disso, a demanda pelo serviço de transporte aeronáutico cresce a cada ano. Neste novo contexto, a comunicação aeronáutica, entre controlador e piloto, está sendo gradualmente substituída de sistemas analógicos de voz para sistemas de redes digitais. Esta substituição afeta os níveis de segurança do sistema, demandando estudos e pesquisas cuidadosas visando essa avaliação.

A comunicação aeronáutica é utilizada durante todas as fases do voo. Contudo, durante as fases de subida e de aproximação os atrasos nesta comunicação têm maior chance de acarretar conflitos e acidentes. Por isso, esta pesquisa focou a avaliação da segurança do CPDLC nas Áreas Terminais.

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa sobre o papel da comunicação no controle de Tráfego Aéreo. Para tanto, estudou-se o sistema de controle de tráfego aéreo, o paradigma CNS/ATM, a comunicação analógica por voz e o CPDLC. Este levantamento revelou que a introdução da comunicação digital pode ser benéfica.

Diante disso, um levantamento dos simuladores aeronáuticos apontou que não existiam simuladores disponíveis capazes de simular o CPDLC. Porém, puderam ser combinados simuladores comerciais com simuladores desenvolvidos nesta pesquisa de forma a obter-se os dados necessários para a avaliação do nível de segurança.

Como uma das contribuições desta pesquisa, tendo como base a plataforma Pipe-SEC desenvolvida no Grupo de Análise de Segurança da EPUSP, foi desenvolvido um simulador que implementa o CPDLC. Este simulador foi utilizado para o entendimento aprofundado do funcionamento dos protocolos e para a simulação do envio de mensagens durante a aplicação da metodologia.

Foram também desenvolvidos novos módulos para a Pipe-SEC. Estes módulos foram então incorporados à plataforma de forma que poderão ser utilizados no desenvolvimento de trabalhos futuros. A pesquisa mostrou viável a utilização deste ambiente no sentido de geração e captura de simulações aeronáuticas.

Como contribuição principal, o ponto central desta pesquisa foi o desenvolvimento de uma metodologia combinando-se simulação aérea em tempo real com simulação de tráfego aéreo em tempo acelerado, visando a avaliação da segurança sobre diversos sistemas de comunicação. Esta metodologia permitiu a determinação destes requisitos de desempenho, caracterizando numa contribuição desta pesquisa, que poderá ser utilizada para embasar novos estudos mais detalhados visando a implementação do CPDLC no espaço aéreo.

Assim, o procedimento de chegada do aeroporto de Congonhas na Terminal São Paulo foi adotado como referência e feita uma simulação da utilização do uso do CPDLC nesta região.

Os resultados obtidos mostraram que a comunicação digital é mais segura do que a analógica por voz nos cenários analisados. Esta pesquisa permitiu verificar que, para a demanda atual de Congonhas (20 pousos por hora), o sistema de comunicação por voz está no limite do atendimento dos níveis de segurança internacionais enquanto que o CPDLC atinge um nível bem maior do que o estabelecido. Este resultado mostra a viabilidade da substituição do sistema de voz pelo digital melhorando-se o nível atual do sistema.

Entretanto, vale salientar que devem ser realizadas análises de segurança aprofundadas da implementação específica do CPDLC antes que esta seja considerada segura.

Durante a realização desta pesquisa, foram identificados alguns pontos que poderão ser explorados em trabalhos futuros.

- Aplicação da metodologia desenvolvida durante o procedimento de *hand-off*;
- Consideração das variações meteorológicas;
- Consideração da grade real de voos previstos;
- Consideração de mais de um tipo de aeronave;
- Cálculo da cobertura do controlador em função da carga de trabalho;
- Cálculo do tempo de reação do piloto com a utilização do CPDLC;
- Cálculo do tempo de reação do controlador com a utilização do CPDLC;
- Propagação de erros e cálculo dos intervalos de confiança dos resultados;
- Validar formalmente o protocolo da camada CPDLC; e
- Estudar o impacto da comunicação híbrida, na qual o piloto recebe a mensagem por voz mas envia o reconhecimento via CPDLC.

Por fim, espera-se que esta metodologia possa ser utilizada na pesquisa e no desenvolvimento de sistemas aeronáuticos mais seguros, e que os resultados aqui apresentados possam ser melhorados com o surgimento de novas técnicas de análise e com um maior conhecimento dos novos sistemas.

REFERÊNCIAS

ALLERTON, D. **Principles of Flight Simulation**. Estado Unidos: John Wiley and Sons, 2009. ISBN 9780470754368.

ANAC. **Anuário Estatístico do Transporte Aéreo**. ,2009. [S.l.]: Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/estatistica/anuarios.asp>>. Acesso em: 26 fev. 2011.

ANAC. **Voos autorizados vigentes (HOTRAN)**. ,2011. [S.l.]: Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/hotran/>>. Acesso em: 26 fev. 2011.

ASKOVIC, M. M. **RAMS and SIMMOD Simulators Comparsion**. Belgrado: Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, 2002. Undergraduate Thesis.

BASTOS, A. L. D.; BAUM, D. M.; CORREIA, A. R. Análise de Capacidade de Operação de Aeronaves nos Boxes do Aeroporto de São Paulo - Congonhas, por meio de Ferramenta de Simulação Computacional. In: **Anais do VII SITRAER. Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

BAZARGAN, M.; FLEMING, K.; SUBRAMANIAN, P. A SIMULATION STUDY TO INVESTIGATE RUNWAY CAPACITY USING TAAM. In: **Anais...** San Diego: wsc, 2002. v. 2, p. 1235-1243. Disponível em: <<http://www.informs-cs.org/wsc02papers/166.pdf>>.

BROOKER, P. Future Air Traffic Management: Quantitative En Route Safety Assessment - Part 1 – Review of Present Methods. **Journal of Navigation**, [S.l.], 2002. v. 55, n. 2, p. 197-211.

BURNS, A.; WELLINGS, A. **Real-Time Systems and Programming Languages: Ada, Real-Time Java and C/Real-Time POSIX**. 4th ed. [S.l.]: Addison-Wesley Educational Publishers Inc, 2009. ISBN 0321417453.

CAASD. **MITRE/VATSIM KLAS Events: Description of Events, Summary of Results**. Virginia: Center for Advanced Aviation System Development, 2008.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 3rd ed. São Paulo: Bravarte, 2010. ISBN 978-85-905978-3-4.

COPPENBARGER, R. A.; KANNING, G.; SALCIDO, R. Real-Time Data Link of Aircraft Parameters to the Center-TRACON Automation System (CTAS). In: **Anais...** Santa Fe, NM, USA: [s.n.], 2001. Disponível em: . Acesso em: 24 apr. 2008.

DARBY, E. **DESIGN REVIEW OF THE CONTROLLER-PILOT DATA LINK COMMUNICATIONS - BUILD I (CPDLC-1) FUNCTIONALITY AND COMPUTER-HUMAN INTERFACE FOR THE DISPLAY SYSTEM REPLACEMENT.** [S.l: s.n.], 1998. Disponível em: . Acesso em: 22 apr. 2008.

DICKINSON, G.; MINNIX, M. Feasibility study of ATN baseline 1 avionics use for U.S. Oceanic air traffic control operations. In: Digital Avionics Systems Conferences, 2000. Proceedings. DASC. The 19th. **Anais...** [S.l: s.n.], 2000. v. 2, p. 7E5/1-7E5/7 vol.2.

EUROCONTROL. **VDL Standards and Recommended Practices (SARPs) Annex 10, Volume III, Part I, Chapter 6.** ,2008. [S.l.]: Eurocontrol. Disponível em: <<http://www.eurocontrol.int/vdl4/gallery/content/public/Standards/P1-Chap06.PDF>>. Acesso em: 24 jul. 2008.

EUROCONTROL; FAA. **A concept paper for separation safety modelling.** ,1998. [S.l.]: Eurocontrol.

EYFERTH, K.; NIESSEN, C.; SPAETH, O. A model of air traffic controllers' conflict detection and conflict resolution. **Aerospace Science and Technology**, [S.l.], 2003. v. 7, n. 6, p. 409-416.

FAA. **Initial Requirements Document for Controller Pilot Data Link Communications (CPDLC) Service.** [S.l: s.n.], 1998. Disponível em: . Acesso em: 22 apr. 2008.

FAA. **FAA CPDLC Specification Build-IA.** ,16 dec 1998b. [S.l.]: Federal Aviation Administration. Disponível em: <http://www.tc.faa.gov/act300/act350/OnLineReports/CPDLC/REQ/CPDLC_la.pdf>. Acesso em: 25 apr. 2008.

FAA. **Midair Collision Avoidance.** ,2008. [S.l.]: Federal Aviation Administration. Disponível em: <http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/tracon/anchorage/pilots_info/mca/>. Acesso em: 26 feb. 2011.

FISTAS, N. **VDL Mode 4: A 15-min Guided Tour.** ,2003

GARCIA, M.; HOFFMAN, J.; ROWLEY, J.; STONE, D. Test for Success: Next Generation Aircraft Identification System RF Simulation. In: Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2007. ICNS '07. **Anais...** Herndon: IEEE, 2007. p. 1-10.

GIL, F. O.; CAMARGO JÚNIOR, J. B.; ALMEIDA JÚNIOR, J. R.; ET AL. PipE-SEC: Platform for Tests and Validation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Operation in Controlled Airspace. **Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society**, [S.l.], 2010. v. 6, n. 2, p. 47-59.

GIL, F. O.; VISMARI, L. F.; CAMARGO JÚNIOR, J. B. Analysis of the CPDLC Real Time Characteristics and the Mode S Data Link Capacity. In: Anais do VII SITRAER. **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. v. 1, p. 92-99.

GRINER JR, J. H. **Flight Test of Weather Data Exchange Using the 1090 Extended Squitter (1090ES) and VDL Mode 3 Data Links**. Disponível em: <<http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2005/CP-2005-213878/12-C1%20-%20Weather%20Products%20and%20Data%20Dissemination%20Technologies/C1-04-GrinerPaper.pdf>>. Acesso em: 8 aug. 2008.

GUNAWARDENA, S.; RANKIN, J. Controller-pilot communications using a VDL Mode 2 datalink for the NASA runway incursion prevention system. In: Digital Avionics Systems, 2001. DASC. The 20th Conference. **Anais...** Daytona Beach: IEEE, 2001. v. 1, p. 2D4/1-2D4/12 vol.1.

HARRIS CORPORATION. **Technical and Economic Benefits of VHF Digital Link Mode 3 Integrated Voice and Data Link for ATC White Paper**. Disponível em: <http://www.harris.com/view_pressrelease.asp?act=lookup&pr_id=1160>. Acesso em: 29 sep. 2008.

ICAO. **Doc 9536 - Review of the General Concept of Separation Panel Sixth Meeting**. ,1988. [S.l.]: International Civil Aviation Organization.

ICAO. **Doc 9705 - Manual of Technical Provisions for the Aeronautical Telecommunications Network (ATN)**. ,1999. [S.l.]: International Civil Aviation Organization. Disponível em: . Acesso em: 23 apr. 2008.

ICAO. **Doc 9750 - Global Air Navigation Plan**. ,aug 2007. [S.l.]: International Civil Aviation Organization. Disponível em: . Acesso em: 23 apr. 2008.

ICAO. **Doc 9880 - Manual on Detailed Technical Specifications for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) using ISO/OSI standards and**

protocols. ,2009. [S.I.]: International Civil Aviation Organization.

ICAO. **Doc 9896 - Manual for the ATN using IPS Standards and Protocols**. ,2010. [S.I.]: International Civil Aviation Organization.

ICAO. **Doc 9925 - Aeronautical Mobile Satellite (Route) Service Manual**. ,jul 2010. [S.I.]: International Civil Aviation Organization.

IVAO. **International Virtual Aviation Organization**. Disponível em: <<http://www.ivao.aero>>.

JACOBS, J. B. JSBSim: An Open Source Flight Dynamics Model in C++. In: Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. **Anais...** Rhode Island: AIAA, 2004.

JACOBS, J. B. Progress On and Usage of the Open Source Flight Dynamics Model Software Library, JSBSim. In: Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. **Anais...** Chicago: AIAA, 2009.

JEPPESEN. **TAAM Solutions**. ,2010. [S.I.]: Jeppesen. Disponível em: <<http://www.preston.net/documents/taambrochure.pdf>>. Acesso em: 18 apr. 2008.

KUCHAR, J. K.; YANG, L. C. A review of conflict detection and resolution modeling methods. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, [S.I.], dec 2000. v. 1, n. 4, p. 179-189.

LAMINAR RESEARCH. **X-Plane**. [S.I: s.n.], 2007. Disponível em: <www.x-plane.com>.

LOZITO, S.; VERMA, S.; MARTIN, L.; DUNBAR, M.; MCGANN, A. The Impact of Voice, Data Link, and Mixed Air Traffic Control Environments on Flight Deck Procedures. In: 5th EUROCONTROL / FAA ATM R&D Seminar. **Anais...** Budapest, Hungary: [s.n.], 2003. p. 57. Disponível em: <http://www.atmseminar.org/seminarContent/seminar5/papers/p_057_HF.pdf>.

MANNING, C.; FOX, C.; PFLEIDERER, E. The Relationship between Air Traffic Control Communication Events and Measures of Controller Taskload and Workload. In: 4th EUROCONTROL / FAA ATM R&D Seminar. **Anais...** Santa Fe, EUA: [s.n.], 2001. p. 161.

MASSIMINI, P.; DIEUDONNE, J.; MONTICONE, L.; LAMIANO, D.; BRESTLE, E.

Insertion of controller-pilot data link communications into the national airspace system: is it more efficient? In: Digital Avionics Systems Conference, 1999. Proceedings. 18th. **Anais...** St Louis: IEEE, 1999. v. 1/17 pp. vol.1, p. 5.A.3-1-5.A.3-6 vol.1.

MCCARTY, W. D.; SHEASBY, S.; AMBURN, P.; STYTZ, M. R.; SWITZER, C. A virtual cockpit for a distributed interactive simulation. **IEEE Computer Graphics and Applications**, [S.l.], 1994. v. 14, n. 1, p. 49-54.

MICROSOFT. **Flight Simulator X**. [S.l: s.n.], 2006. Disponível em: <<http://www.microsoft.com/games/flightsimulatorx/>>.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **AIC-N 12/04 - Testes ADS/CPDLC na FIR Atlântico**. , 2004. [S.l.]: Ministério da Defesa. Disponível em: <<http://publicacoes.decea.gov.br/index.cfm?i=publicacao&id=3368>>. Acesso em: 27 feb. 2011.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **PCA 351-3 - Programa de Implementação ATM Nacional**. ,2009a. [S.l.]: Ministério da Defesa. Disponível em: <<http://www.decea.gov.br/cns-atm/arquivo/PImpATM.pdf>>.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **ICA 100-12 - Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo**. ,2009b. [S.l.]: Ministério da Defesa.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **AIC 10/09 - Sistema Global de Navegação por Satélites - GNSS**. ,2009c. [S.l.]: Ministério da Defesa.

MINISTÉRIO DA DEFESA. **IAC RNAV (GNSS) RWY 17R**. ,2010. [S.l.]: Ministério da Defesa. Disponível em: <<http://www.aisweb.aer.mil.br/>>. Acesso em: 26 feb. 2011.

MURR, D. **Flight Gear**. [S.l: s.n.], 1996. Disponível em: <<http://www.flightgear.org/>>.

SAGER, D. **Simulator evaluation of manually flown curved instrument approaches**. [S.l.]: NASA, 1973. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?N=0&Ntk=all&Ntx=mode%20matchall&Ntt=74N33454>>. Acesso em: 26 feb. 2011.

STUDENBERG, F. The Capacity and Performance of a CPDLC System Using VDL Mode E. In: **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2005. v. 1, p. 1.B.4 - 1.1-9. Disponível em: <http://www.studenberg.com/images/Mode_E_CPDLC_network.pdf>. Acesso em: 22 apr. 2008.

STUDENBERG, F. VDL Mode E Receiver Performance Measurements. In: 25th Digital Avionics Systems Conference, 2006 IEEE/AIAA. **Anais...** Portland: IEEE, 2006. p. 1-6.

STUDENBERG, F. VDL mode E receiver performance measurements. **Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE**, [S.l.], 2007. v. 22, n. 4, p. 34-38.

TADEMA, J.; THEUNISSEN, E. A display concept for UAV autoland monitoring: rationale, design and evaluation. In: Proceeding of Digital Avionics Systems Conference, 2007. DASC '07. IEEE/AIAA 26th. **Anais...** Dallas, TX: IEEE, 2007.

VATSIM. **Virtual Air Traffic Simulation Network**. Disponível em: <<http://www.vatsim.net>>. Acesso em: 28 feb. 2011.

WICKENS, C. D.; MAVOR, A. S.; MCGEE, J.; AUTOMATION, N. R. C. (. P. O. H. F. I. A. T. C. **Flight to the future: human factors in air traffic control**. [S.l.]: National Academies Press, 1997. ISBN 9780309056373.

GLOSSÁRIO

1090 ES: 1090 *Extended Squitter* é um canal de retorno do SSR.

ACK: *Acknowledge*, ou Reconhecimento, é a confirmação de recebimento de uma mensagem enviada em meio digital.

ADS: *Automatic Dependent Surveillance*, ou Vigilância Automática Dependente, é o novo sistema de vigilância adotado no CNS/ATM.

ADS-B: ADS *Broadcast*, ou ADS por difusão.

ADS-C: ADS *Contract*, ou ADS por contrato.

APP: *Approach*, ou Aproximação, é o órgão ATC responsável por uma TMA.

ASN.1: *Abstract Syntax Notation.1*, ou Notação de Sintaxe Abstrata 1, é uma notação para definição de mensagens de uma linguagem.

ATC: *Air Traffic Control*, ou Controle de Tráfego Aéreo.

ATCo: *Air Traffic Controller*, ou Controlador de Tráfego Aéreo.

ATM: *Air Traffic Management*, ou Gerenciamento do Tráfego Aéreo.

ATN: *Aeronautical Telecommunications Network*, ou Rede de Comunicações Aeronáutica.

bps: *bits per second*, ou bits por segundo é uma unidade de medida de velocidade de transmissão.

CAASD: *Center for Advanced Aviation Systems Development of MITRE Corporation*, é um instituto de pesquisa filiado ao MITRE.

CNS/ATM: *Communications, Navigation, Surveillance Systems for Air Traffic Management*, ou Sistemas de Comunicação, Navegação e Vigilância para o Gerenciamento do Tráfego Aéreo, é o novo paradigma de ATC.

CPDLC: *Controller Pilot Data-Link Communications*, é a aplicação de comunicação entre pilotos e controladores da ATN.

CSMA: *Carrier Sense Multiple Access*, ou Acesso Múltiplo com Sensoriamento da Portadora é uma forma de acesso ao meio físico.

CTR: *Center*, ou Centro de Controle, é o órgão ATC responsável por uma FIR.

CTZ: *Control Zone*, ou Zona de Controle.

DECEA: Departamento de Controle do Espaço Aéreo, é o órgão responsável pela regulamentação aeronáutica no Brasil.

DEL: *Delivery*, ou Despacho, é o órgão ATC responsável pela aprovação de planos de voo.

DME: *Distance Measuring Equipment*, ou Equipamento de Medição de Distância, é um rádio-auxílio que permite a determinação da distância de afastamento.

DS: *Dialog Service*, ou Serviço de Diálogo, é um serviço da ATN.

EHS: *Mode S Enhanced Surveillance*, ou Vigilância de Modo S aperfeiçoado é uma tecnologia de Radar secundário.

Eurocontrol: é o órgão da União Europeia que regulamenta a aviação na Europa.

FAA: *Federal Aviation Administration*, é o órgão responsável pela regulamentação aeronáutica nos Estados Unidos da América.

FIR: *Flight Information Region*, ou Região de Informação de Voo.

FSX: Microsoft *Flight Simulator X*, é o simulador de voo da empresa Microsoft.

GALILEO: é um tipo de GNSS, mantido pela União Europeia.

GND: *Ground*, ou Solo, é o órgão ATC responsável pelos movimentos em solo dentro de um aeroporto.

GNSS: *Geographical Navigation Satellite Systems*, ou Sistema baseado em Satélite para Navegação Geográfica.

GPS: *Global Position System*, ou Sistema de Posicionamento Global, é um tipo de GNSS, mantido pelos EUA.

HF: *High Frequency*, ou Frequência Alta, é uma faixa de comunicação via rádio.

Hz: abreviação de Hertz, uma unidade de medida de frequência.

IAC: *Instruments Approach Chart*, ou Carte de Pouso por Instrumentos, determina os parâmetros para o uso do ILS.

ICAO: *International Civil Aviation Organization*, ou OACI, é o órgão responsável pela regulamentação aeronáutica no mundo.

IHC: Interface Humano-Computador, é o meio pelo qual uma pessoa interage com um sistema computacional.

ILS: *Instrument Landing System*, ou Sistema de Pouso por Instrumento, é o sistema que permite pousos com baixa visibilidade.

INCT-SEC: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos é um projeto de pesquisa do CNPq que integra diversos laboratórios brasileiros para o desenvolvimento e pesquisa de sistemas embarcados críticos.

IP: *Internet Protocol*, ou Protocolo de Internet é um dos protocolos de rede da Internet.

IPS: *Internet Protocols Suite*, ou Conjunto de Protocolos da Internet é o conjunto de protocolos TCP, UDP e IP.

ISO: *International Organization for Standardization*.

ITU: *International Telecommunication Union*, é o órgão que determina padrões de telecomunicações.

IVAO: *International Virtual Aviation Organization*, ou Organização Internacional de Aviação Virtual, é uma rede de simulação de tráfego aéreo.

MITRE: é uma organização sem fins lucrativos que apoia o Departamento de Defesa dos EUA.

NDB: *Non-Directional Beacon*, ou Farol Não Direcional, é um rádio-auxílio baseado em rádio AM.

nm: *Nautical Mile*, ou Milhas Náuticas, é uma unidade de medida de distância, equivalente à 1.86km.

OACI: Organização Internacional de Aviação Civil, ou ICAO, é o órgão responsável pela regulamentação aeronáutica no mundo.

OSI: *Open Systems Interconnection* é um modelo de interconexão de redes definida pela ISO.

PER: *Packet Encoding Rules*, ou Regras de Codificação de Pacotes, é um método para codificação de dados.

Pipe-SEC: Plataforma Integrada para Ensaios de Sistemas Embarcados Críticos, é o ambiente de simulação desenvolvido nesta pesquisa.

PTT: *Push-To-Talk*, ou Pressione-Para-Falar.

Radar: *Radio Detection And Ranging*, ou Detecção e Telemetria pelo Rádio, é a tecnologia que permite a aquisição do posicionamento horizontal das aeronaves no espaço aéreo.

RAMS: *Reorganized ATC Mathematical Simulator*, é um simulador de tráfego aéreo.

RVSM: *Reduced Vertical Separation Minima* é uma regra de voo com separação vertical reduzida.

SID: *Standard Instrument Departure*, ou Saída Padrão por Instrumentos, é o procedimento utilizado após as decolagens.

SIMMOD: *Airport and Airspace Simulation Model*, é um simulador de tráfego aéreo.

SSR: *Secondary Surveillance Radar*, ou Radar de Vigilância Secundário é um sistema Radar que permite a identificação da aeronave e sua altitude.

STAR: *Standard Terminal Arrival Route*, ou Rota Padrão de Chegada à Terminal, é o procedimento utilizado para sequenciamento e pouso de aeronaves.

TAAM: *Total Airspace and Airport Modeler*, é um simulador de tráfego aéreo.

TCAS: *Traffic Collision Avoidance System* é um sistema que permite que as aeronaves se identifiquem e evitem colisões.

TCP: *Transmission Control Protocol*, ou Protocolo de Controle de Transmissão é um dos protocolos orientados à conexão da Internet.

TDMA: *Time Division Multiple Access*, ou Acesso Múltiplo com Divisão de Tempo é uma forma de acesso ao meio físico.

TMA: *Terminal Area*, ou Área Terminal.

TWR: *Tower*, ou Torre, é o órgão ATC responsável pelas adjacências de um aeródromo.

UAT: *Universal Access Transceiver* é um sistema de comunicação via satélite.

UDP: *User Datagram Protocol*, ou Protocolo de Datagrama do Usuário, é um dos protocolos não orientados à conexão da Internet.

VATSIM: *Virtual Air Traffic Simulation Network*, ou Rede de Simulação de Tráfego Aéreo Virtual, é uma rede de simulação de tráfego aéreo.

VDL: VHF *Data Link*, ou Enlace de Dados sobre VHF, é uma forma de transmissão digital sobre rádio.

VDL-2: VDL *Mode 2*, ou VDL modo 2.

VDL-3: VDL *Mode 3*, ou VDL modo 3.

VDL-4: VDL *Mode 4*, ou VDL modo 4.

VDL-E: VDL *Mode E*, ou VDL modo E.

VHF: *Very High Frequency*, ou Frequência Muito Alta, é uma faixa de comunicação via rádio.

VoIP: *Voice Over IP*, ou Voz Sobre IP.

VOR: *VHF Omnidirectional Range* é um rádio-auxílio baseado em rádio VHF.

APÊNDICE A – RESULTADOS COMPLEMENTARES

Tabela 9 - MTTUF [h.10⁹] da rede em função da demanda.

Rede	Demanda [pousos/h]				
	15	20	30	60	90
B	9,20E+008	7,99E+008	7,64E+008	5,58E+008	4,84E+008
C	8,34E+008	7,42E+008	7,02E+008	5,20E+008	4,57E+008
D	5,43E+008	5,17E+008	4,73E+008	3,75E+008	3,43E+008
Voz	4,38E+008	4,15E+008	3,81E+008	3,12E+008	2,92E+008
TLS	4,00E+008	4,00E+008	4,00E+008	4,00E+008	4,00E+008

Tabela 10 - Taxa de falhas da rede função da demanda.

Rede	Demanda [pousos/h]				
	15	20	30	60	90
B	11,48%	12,31%	13,94%	19,45%	22,66%
C	12,71%	13,60%	15,25%	20,98%	24,15%
D	20,00%	20,96%	23,24%	29,99%	33,13%
Voz	25,21%	26,58%	29,41%	36,84%	39,72%

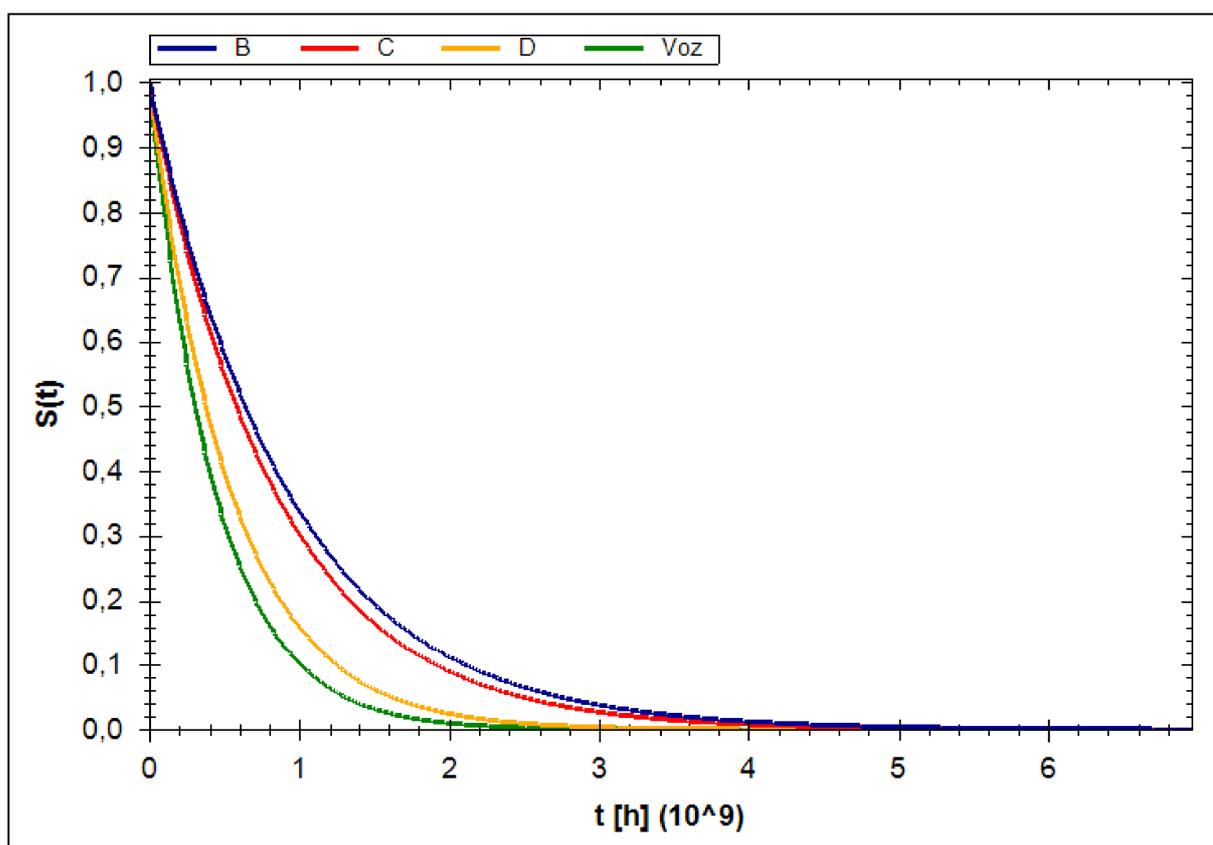


Figura 68 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 15 pousos/hora.

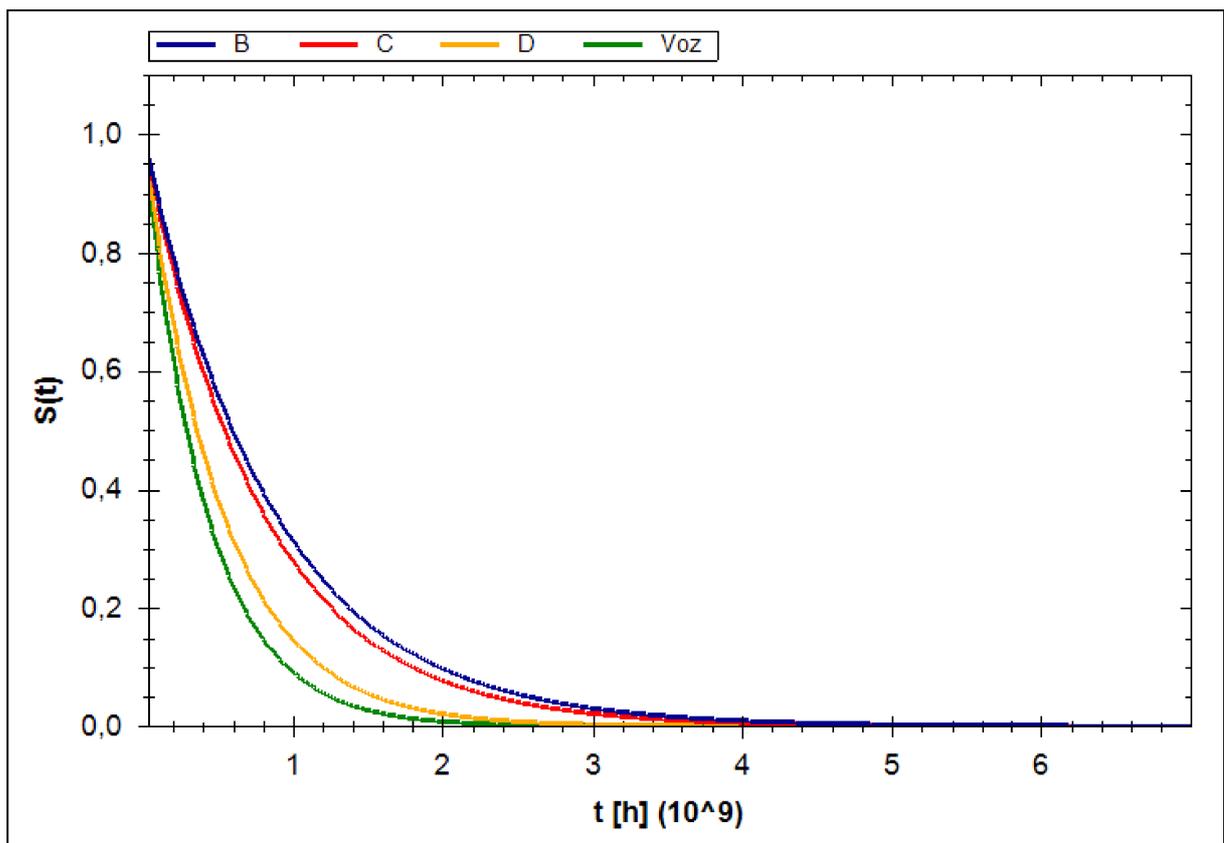


Figura 69 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 20 pousos/hora.

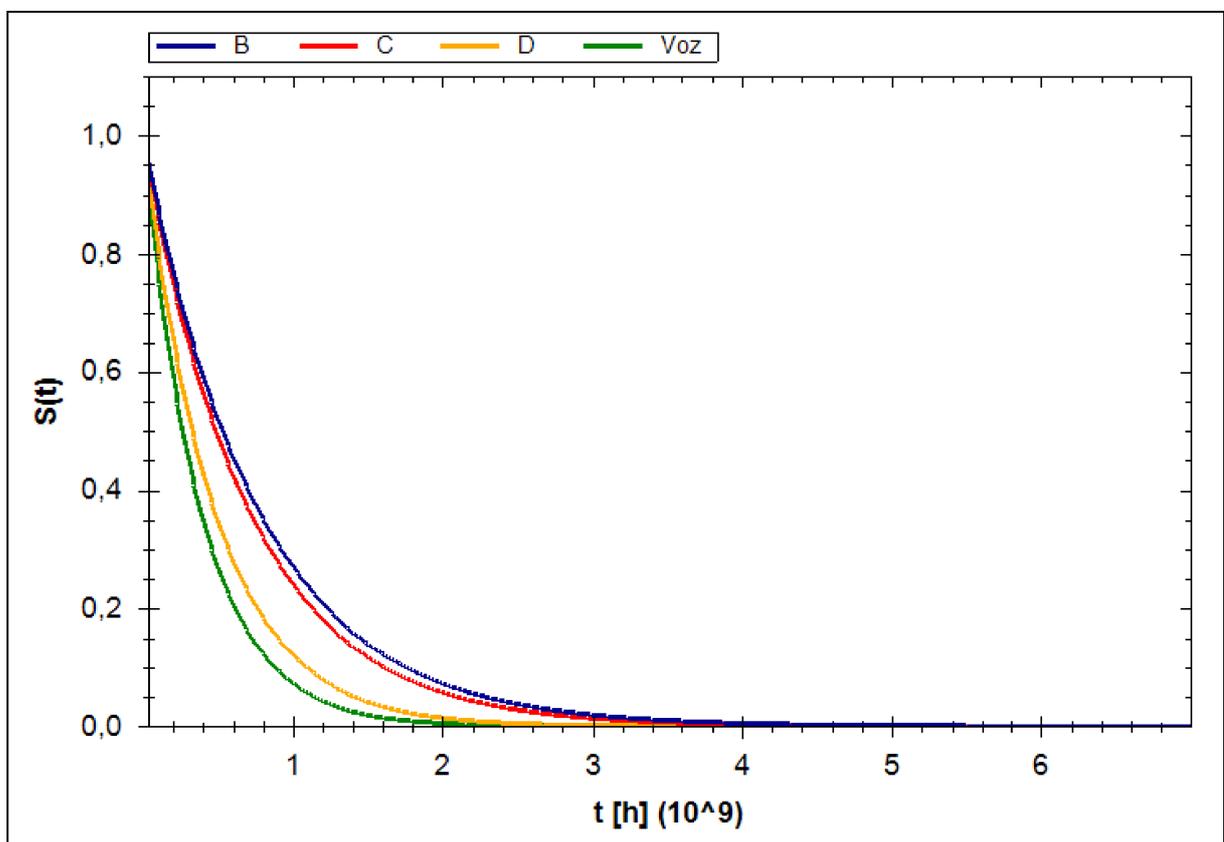


Figura 70 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 30 pousos/hora.

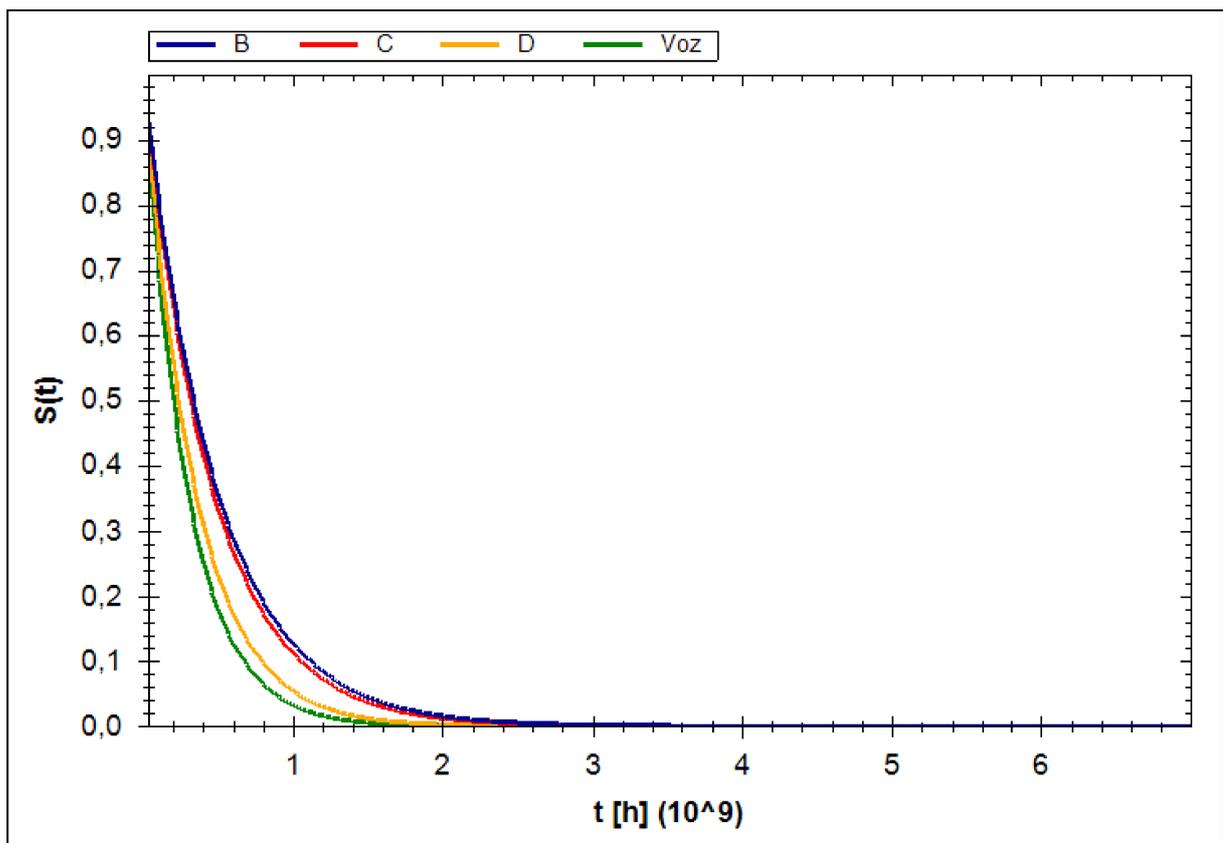


Figura 71 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 60 pousos/hora.

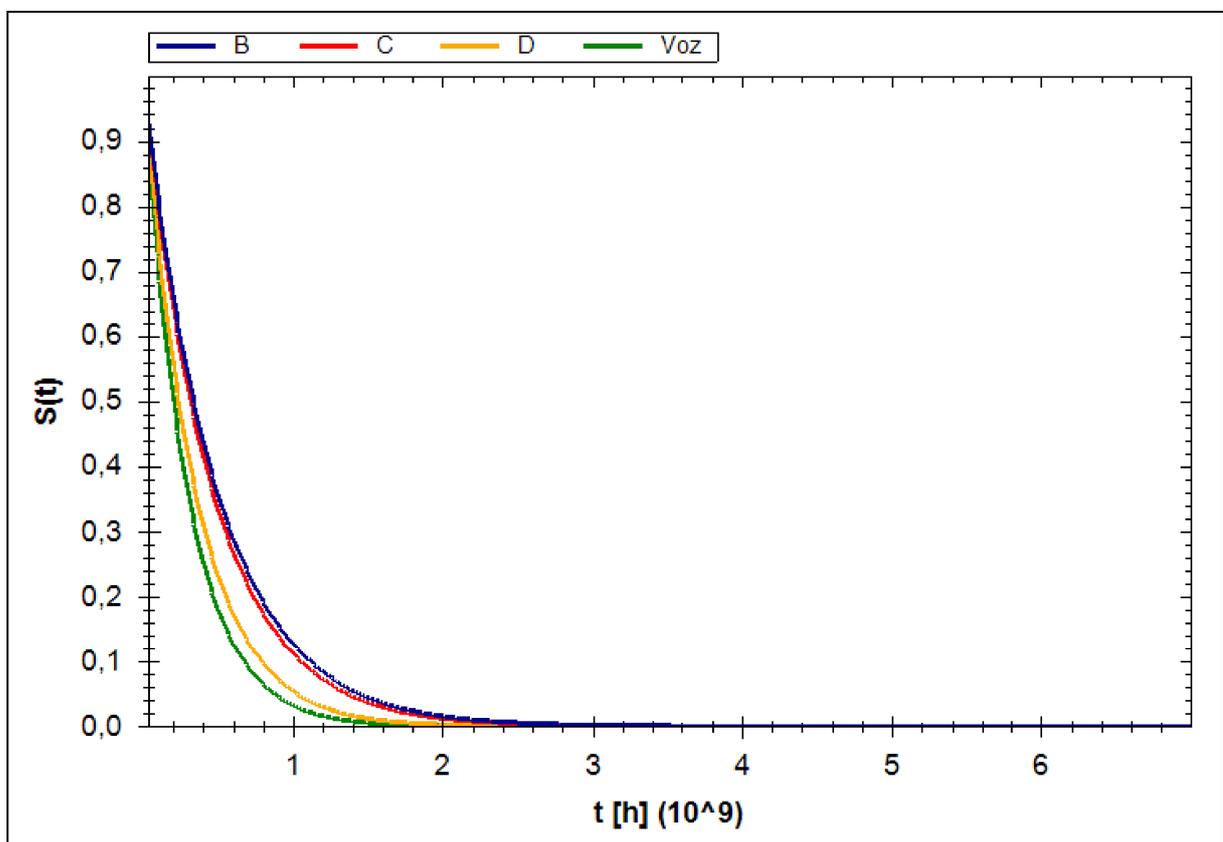


Figura 72 - Função Segurança do Espaço Aéreo para 90 pousos/hora.