MAGALI ANDREIA ROSSI

**Avaliação do Uso da Rede de Telecomunicações
Aeronáuticas (ATN) para Comunicação Digital na Operação
de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)**

São Paulo
2013

MAGALI ANDREIA ROSSI

**Avaliação do Uso da Rede de Telecomunicações
Aeronáuticas (ATN) para Comunicação Digital na Operação
de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutora em
Ciências.

Área de Concentração:
Sistemas Digitais

Orientador:
Prof. Dr. Jorge Rady de Almeida Junior

São Paulo
2013

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

São Paulo, 06 de setembro de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Rossi, Magali Andreia

Avaliação do uso da rede de telecomunicações aeronáuticas (ATN) para comunicação digital na operação de veículos aéreos não tripulados (VANT) / M.A. Rossi. – versão corr. -- São Paulo, 2013.

118 p.

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

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

Com todo amor do mundo, dedico este trabalho aos meus pais

Virgílio e Eva.

Vocês são imprescindíveis na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao chegar o momento de escrever os agradecimentos fica tão difícil nomear a quem posso agradecer, pois me vem à mente as diversas pessoas incríveis que, de diversas formas, me ajudaram a conquistar mais esse objetivo. Muitas dessas pessoas eu posso agradecer pelo simples fato de existirem e me darem oportunidade de participar de suas vidas, participarem da minha e compartilharem comigo momentos alegres, difíceis ou de dúvidas.

Assim, inicio meus agradecimentos à minha família. São as pessoas que me fazem acreditar e seguir adiante nas minhas escolhas. Não consigo imaginar como seria todo esse trajeto sem vocês!

Ao Prof. Dr. Jorge Rady de Almeida Junior por aceitar a orientar meus estudos. Não somente nesta etapa de doutoramento, mas por todos os anos anteriores que acreditou e me deu a chance de demonstrar meus trabalhos. Muito obrigada pela amizade, atenção e ensinamentos, sempre muito importantes para mim.

Aos Professores Dr. João Batista Camargo Junior e Dr. Paulo Sérgio Cugnasca, por também sempre apoiarem e acreditarem em minhas propostas de estudo, além de me permitirem um maior aprendizado e aperfeiçoamento profissional com este convívio.

Aos amigos do Grupo de Análise de Segurança, Edmur Canzian, Ricardo Gimenes, Lucio Vismari, Daniel Baraldi, Marcelo Lopes, Jamilson Bispo e Valter Avelino, por momentos de boas conversas e descontração. Sem esquecer o grande apoio nos assuntos administrativos de Edilaine Lemos e Ricardo Franco.

A valorosa ajuda dos estudantes de graduação Fabrício Barros de Oliveira e Raphael Vitor Costa dos Santos, que nos últimos meses enfrentaram o desafio de auxiliar-me na concretização da compreensão e no uso das ferramentas para concluir o ambiente de simulação. Obrigada. Vocês me ajudaram a sofrer menos!

Um agradecimento especial para o Prof. Dr. Andrea Bondavalli e Dr. Paolo Lollini do “Dipartimento di Sistemi ed Informatica” da Università degli Studi di Firenze, por me

AGRADECIMENTOS

receberem no departamento, compartilhando seus conhecimentos e me ajudando a sanar inúmeras dúvidas.

Ao amigo Mario Corrêa, com quem tanto discuti minhas idéias e quem muito contribuiu para meus questionamentos sobre esse projeto de pesquisa. Também ao amigo Antonio Vieira da Silva que sempre gentilmente dispunha de atenção em momentos de dúvidas e pelas diversas e sempre agradáveis conversas em momentos descontraídos.

Ao Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, por meio da FATEC de Carapicuíba, por proporcionar condições profissionais durante os anos de estudos de doutoramento. A possibilidade de participar do Projeto de Regime de Jornada Integral foi fundamental para que eu pudesse me dedicar profundamente ao desenvolvimento e conclusão dessa pesquisa.

Ao INCT-SEC (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos), por meio do grupo de Sistemas Aéreos Não Tripulados – GT3, por disponibilizar o uso de equipamentos e apoio na participação em eventos.

Ao Eng. Ricardo Ramos, da National Instruments, pela valorosa ajuda com informações sobre a programação do Labview. Muitas foram nossas dúvidas e sempre nos atendeu com a mesma gentileza e competência.

Enumeráveis são os amigos pessoais que carrego no coração e que agradeço. O fato de vocês entenderem a frase “Hoje não posso ir!” já fazem de vocês pessoas especiais para mim. Obrigada por todo apoio em momentos de tantas restrições de tempo.

Por fim, à Deus, por me permitir ter condições de finalizar mais esse trabalho.

"Uma vez que você prove o voo, nunca mais você caminhará sobre a terra sem olhar para os céus, pois você já esteve lá, e para lá sua alma deseja voltar."

Leonardo Da Vinci

"He felt that his whole life was some kind of dream and he sometimes wondered whose it was and whether he were enjoying it."

Douglas Adams

RESUMO

Esta Tese apresenta uma contribuição para avaliação da comunicação digital na operação de veículos aéreos não tripulados (VANT) no ambiente aeronáutico. A comunicação digital aeronáutica relaciona-se diretamente ao nível de segurança crítica desejado para o controle do fluxo de tráfego aéreo, por parte de autoridades e de órgãos normativos, os quais possuem como objetivo tornar a comunicação uniforme para todos os continentes. Diversas são as discussões acerca do nível de segurança crítica que a comunicação digital entre VANT e controle em terra possa exibir, sempre buscando redução da exposição a riscos inerentes à operação desse tipo de veículo. Nesse contexto, a proposta desta Tese é avaliar a segurança na comunicação digital, por meio do uso de injeção de falhas, para operações de veículos aéreos não tripulados. Este trabalho descreve a importância de analisar as interferências causadas por falhas na comunicação digital, relacionadas ao envio de mensagens entre o órgão de controle e a aeronave não tripulada. Também são definidos quais os tipos de falhas que causam um maior impacto na comunicação, bem como quais os parâmetros que devem ser utilizados para manipulação das variáveis de falhas na comunicação. Para atender a avaliação proposta, foi utilizado o ambiente simulado que reúne as características do ambiente aeronáutico, denominado PipE-SEC (Plataforma Integrada para Ensaios de Sistemas Embarcados Críticos), bem como o protocolo CPDLC (*Controller-Pilot Data Link Communications*) para troca de mensagens digitais.

Palavras chave: Espaço Aéreo. Comunicação Digital. Infraestrutura de Sistemas Críticos.

ABSTRACT

This thesis presents a contribution to the evaluation of digital communication in the operation of unmanned aerial vehicles (UAV) in the aeronautical environment. Aeronautical digital communication relates directly to the critical safety level required for controlling the air traffic flow by authorities and regulatory agencies, which are aimed at making communication uniform for all continents. There are several discussions about the safety critical level that digital communication between UAVs and ground control can display, always seeking to reduce exposure to risks inherent in the operation of such vehicles. In this context, the proposal of this thesis is to evaluate the safety in digital communication, through the use of fault injection for operations of UAV. This work describes the importance of analyzing the interference caused by faults in digital communication related to sending messages between the control agency and the UAV. There are also defined what types of faults cause a greater impact on communication as well as which parameters should be used to simulate communication faults. To answer the proposed evaluation, we used the simulated environment that combines the features of the aeronautical environment, called PIpE-SEC (Integrated Platform for Test Critical Embedded Systems), as well as the protocol CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communications) to exchange digital messages

Keywords: Airspace. Digital Communication. Critical Infrastructure Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemática para o Desenvolvimento de um Método (Fonte: Adaptado (MARCONI; LAKATOS, 2003)).....	24
Figura 2 – Esquemática para o Desenvolvimento de um Método (Fonte: Adaptado (YIN, 2010)).....	26
Figura 3 – Fundamentos Teóricos para o Desenvolvimento da Proposta.....	28
Figura 4 – Representação dos Componentes do ATM Global (Fonte: (AERONÁUTICA, 2012)).....	30
Figura 5 – Representação do Ângulo de Ultrapassagem sendo Inferior a 70º.....	33
Figura 6 – Representação da Ultrapassagem Mantendo-se a Direita.....	34
Figura 7 – Representação da Distância Mínima para Ultrapassagem.	34
Figura 8 – Representação dos Requisitos de Separação Mínima entre Aeronaves (Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, I. R. DE, 2003))	36
Figura 9 – Representação da Arquitetura do Modelo OSI (Fonte: Adaptado de (KUROSE; ROSS, 2006), (FARREL, 2005)).	39
Figura 10 – Representação da Arquitetura do Modelo TCP/IP (Fonte: Adaptado de (KUROSE; ROSS, 2006), (FARREL, 2005)).	40
Figura 11 – Tamanho do Pacote de Dados para Endereçamento ATN (Fonte:(ICAO, 2011)).....	43
Figura 12 – Arquitetura ATN com o Uso do Protocolo IPv6 (Fonte: Adaptado de (NETTO; KHANNA, 2003)).....	46
Figura 13 – Representação Funcional da Aplicação CPDLC. (Fonte: (ICAO, 2010))	47
Figura 14 – Divisão de Categorias para Uso de Aeronaves VANT (Fonte: (TAYLOR, 2010)).....	50
Figura 15 – Arquitetura de Comunicação Atual para Aeronaves VANT, utilizando o Link de Comunicação.....	51
Figura 16 – Representação do Sistema de Lançamento de Aeronaves VANT.....	51
Figura 17 – Representação do Sistema de Recuperação de Aeronaves VANT.	52
Figura 18 – Arquitetura de Comunicação Usando CPDLC.	53
Figura 19 – Componentes para um ambiente de simulação (Fonte: Adaptado (HSUEH <i>et al.</i> , 1997)).	58
Figura 20 – Representação de Transmissão de Pacotes em uma Rede.	61

Figura 21 – Representação da Integração dos Módulos do Ambiente de Simulação.	63
Figura 22 – Arquitetura Funcional do Ambiente de Simulação (Fonte: Adaptado (GIL, F. DE O. <i>et al.</i> , 2009)).	64
Figura 23 – Representação dos Módulos Aplicados aos Elementos da Plataforma PlpE-SEC.	66
Figura 24 – Parâmetros Utilizados para Análise.	69
Figura 25 – Visão Ampla da Relação do Módulo de Falha ATN no Ambiente Aeronáutico.	71
Figura 26 – Cenário Referente ao Ambiente de Comunicação Simulado.	71
Figura 27 – Conexão do Módulo de Falha ATN à Plataforma PlpE-SEC. (Fonte: (ROSSI <i>et al.</i> , 2012)).	79
Figura 28 – Visão Estrutura do Ambiente de Simulação	82
Figura 29 – Estrutura do Módulo de Falha ATN.	83
Figura 30 – Apresentação do Trajeto da Mensagem Início-fim.	84
Figura 31 – Visão em Camadas da Aplicação CPDLC.	85
Figura 32 – Tela Inicial do ACARS Server.	86
Figura 33 – Tela Inicial do CPDLC YSSY.	86
Figura 34 – Relação das Aeronaves.	87
Figura 35 – Tela para Composição da Estrutura das Mensagens CPDLC.	87
Figura 36 – Telas de Configuração das Portas TCP.	89
Figura 37 – Arquivo de Texto com as Informações das Mensagens Enviadas/Recebida pela Aplicação.	89
Figura 38 – Fases da Evolução do Trabalho de Doutorado.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação de Disponibilidade dos Serviços das Aplicações com Uso do TCP/IP (Fonte: Adaptado de (DHAS <i>et al.</i> , 2000)).	45
Tabela 2- Comparativo Entre Ambientes para Injeção de Falhas.	67
Tabela 3- Classificação das Falhas a serem Injetadas.	73
Tabela 4- Classificação de Atrasos Permitidos. (Fonte: (ICAO, 1999b)).	75
Tabela 5- Classificação das Mensagens.	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria CLIMB.	95
Gráfico 2: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria ROUTE.....	95
Gráfico 3: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria DESCEND.....	96
Gráfico 4: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria EMERG.	96
Gráfico 5: Comparativo Utilizando Intervalo para Envio das Mensagens.	98
Gráfico 6: Comparativo de Mensagens Enviadas com Erro e sem Erro de Conteúdo.	99
Gráfico 7: Mensagens Utilizando o Parâmetro Δt com Tempo não Permitido.....	100
Gráfico 8: Mensagens Enviadas Durante a Falha por Colapso.....	101

LISTA DE SIGLAS

ACARS	<i>Aircraft Communications Addressing and Reporting System</i>
ACC	<i>Area Control Center</i>
ADS	<i>Automatic Dependent Surveillance</i>
AFTM	<i>Aeronautical Fixed Telecommunications Network</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
APP	<i>APProach Control</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATCo	<i>Air Traffic Controller</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATM Global	<i>Global Air Traffic Management</i>
ATM SDM	<i>ATM Service Delivery Management</i>
ATN	<i>Aeronautical Telecommunications Network</i>
ATS	<i>Air Traffic Service</i>
ATSC	<i>Air Traffic Service Communications</i>
AO	<i>Aerodrome Operations</i>
AOM	<i>Airspace Organization and Management</i>
ARP	<i>Aeronave Remotamente Pilotada</i>
AUO	<i>Airspace User Operations</i>
CM	<i>Conflict Management</i>

CNS/ATM	<i>Communication, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management</i>
CPDLC	<i>Controller-Pilot Data Link Communications</i>
CPDLC-AE	<i>CPDLC- application entity</i>
CPDLC-CF	<i>CPDLC-control function</i>
CPDLC-ASE	<i>CPDLC- application service element</i>
CTR	<i>Control Zone</i>
DCB	<i>Demand / Capacity Balancing</i>
DS	<i>Dialog Service</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FSX	<i>Fligh Simulator X</i>
HIL	<i>Hardware In the Loop</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
INFIMO	<i>INtrusive less Fault Injector MOdule</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>Internet Protocol version 6</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IVAO	<i>International Virtual Aviation Organization</i>
MCDU	<i>Multipurpose Control Display Unit</i>
NM	<i>Nautical Miles</i>

NSAP	<i>Network Service Access Point</i>
OSI	Interconexão de Sistemas Abertos
PIpE-SEC	Plataforma Integrada para Ensaio de Sistemas Embarcados Críticos
RFC	<i>Request For Comments</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
TS	<i>Traffic Synchronization</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i>
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Justificativa	19
1.2. Objetivo	20
1.3. Organização do Trabalho.....	21
2. METODOLOGIA DA PESQUISA	22
2.1. Considerações Finais deste Capítulo	29
3. SISTEMAS E CONCEITOS SOBRE O ESPAÇO AÉREO	30
3.1. Sistema ATM Global	30
3.2. Separação Mínima entre Aeronaves	32
3.3. Rede de Telecomunicações Aeronáuticas (ATN)	37
3.3.1. Aplicação do Modelo TCP/IP na ATN	38
3.3.2. Transmissão de Dados em ATN	41
3.3.3. IPv6 para Transmissão de Dados em ATN.....	43
3.3.4. Mecanismo de Comunicação CPDLC	46
3.4. Aeronaves VANT (Veículo Aéreo não Tripulado).....	49
3.5. Considerações Finais deste Capítulo	54
4. CARACTERÍSTICAS DE UM AMBIENTE DE INJEÇÃO DE FALHAS.....	56
4.1. Componentes de um Ambiente de Simulação	57
4.2. O Uso da Injeção de Falhas em Redes de Computadores	59
4.3. Considerações Finais deste Capítulo	61
5. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA ENSAIOS DE SISTEMAS EMBARCADOS CRÍTICOS	62
5.1. Comparação com Outros Ambientes de Simulação.....	67
5.2. Considerações Finais deste Capítulo	68
6. PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS NA COMUNICAÇÃO AERONÁUTICA	69

SUMÁRIO

6.1. Ambiente Aeronáutico onde se Insere o Módulo de Falha ATN.....	70
6.1.1. Elementos Considerados no Ambiente ATN.....	72
6.1.2. Parâmetros Considerados no Módulo de Falha ATN.....	73
6.1.3. Método de Simulação Aplicado ao Módulo de Falha ATN	76
6.2. Características do Módulo de Falha ATN	78
6.3. Premissas e Parâmetros Considerados para Uso do Módulo de Falha ATN	80
6.4. Ambiente de Simulação para Análise de Interferências	81
6.4.1. Estrutura do Módulo para Injeção de Falhas (Módulo de Falha ATN)	82
6.4.2. Aplicação Utilizada para Envio de Mensagens CPDLC	85
6.5. Considerações Finais deste Capítulo	92
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	93
8. CONCLUSÕES.....	103
8.1. Evolução do Trabalho	104
8.2. Contribuição do Trabalho	106
8.3. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	107
8.4. Considerações Finais.....	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO DAS MENSAGENS CPDLC	114
ANEXO 1 – ALGORITMO VERIFICADOR	115

1. INTRODUÇÃO

Podem-se observar, nas últimas décadas, os esforços desenvolvidos pelo ser humano no âmbito de propor novas tecnologias para aviação, proporcionando a apreciação de feitos quase que inimagináveis. Em muitos casos, essas tecnologias, que ainda não eram completamente entendidas em sua magnitude e real aplicação, eram vistas somente como mais um simples sonho de pessoas distantes de suas realidades.

No ano de 1452, em Anchiano - vilarejo de Vinci, Itália, nasceu Leonardo Da Vinci, talvez a primeira pessoa a pensar em desenvolvimentos aplicados à área da aviação. Fascinado pelo fenômeno do voo, esse grande cientista, que foi muito além de seu tempo, e até hoje é referenciado na área de engenharia por ser o criador do primeiro conceito de um helicóptero, por volta do ano de 1550 (ARASSE, 1998).

O fascínio desenvolvido pela possibilidade de voar não parou nesta época. No ano de 1906 houve o grande marco para a área da aviação, o primeiro voo realizado por Alberto Santos-Dumont a bordo de sua máquina voadora que recebeu o nome de 14 Bis (CYTRYNOWICZ, 2006).

Desde então, e, alcançando os dias atuais, diversos são os desenvolvimentos e aplicações que contribuem com formas mais seguras de prover o voo. Como parte essencial desta evolução, podem-se evidenciar os crescentes avanços nas áreas que abrangem as comunicações aeronáuticas.

A comunicação aeronáutica representa um fator de grande importância para manter o controle de tráfego aéreo em sua mais alta organização, além de prover condições para suporte a aeronaves que estejam em condições críticas de voo. São inclusas nesta comunicação as aeronaves conhecidas como VANT (Veículo Aéreo não Tripulado) e as aeronaves tripuladas.

Essas aeronaves, cuja síntese é operar sem um piloto a bordo, recebem diversas definições, como, VANT (Veículo Aéreo não Tripulado), termo utilizado no Brasil, UAS - *Unmanned Aircraft System*, termo utilizado pelos Estados Unidos, além do termo Aeronave Autônoma quando seu funcionamento é baseado em controle de

decisão autônomo, ou seja, não dependendo de um piloto remoto para seu controle (OLIVEIRA, C. P. DE, 2009). Nesta Tese utiliza-se o termo VANT no decorrer de todo o texto.

O objetivo na condição de manter um fluxo aéreo organizado e em sua plena capacidade, aliado à busca por um número de falhas cada vez menor na comunicação aeronáutica, apresenta relacionamento direto com a capacidade do controle de tráfego aéreo se sobrepôr a possíveis condições de instabilidades geradas em seus sistemas.

1.1. Justificativa

A discussão relativa à segurança em voo é alvo de constante atenção. Tal preocupação se intensifica quando se trata, especificamente, de voos realizados por VANT, dando-se especial atenção sobre quais poderiam ser suas possíveis consequências à sociedade e ao espaço aéreo.

A possibilidade de usar um ambiente, no qual podem ser analisados os efeitos que podem ocorrer na comunicação, quando esta for atingida por falhas é uma importante questão proposta por este trabalho.

Nesse contexto, diversas questões são direcionadas à possibilidade de aeronaves VANT dividirem o mesmo espaço aéreo que aeronaves tripuladas. Ainda há muitas dúvidas sobre a utilização de tecnologias que permitam que aeronaves não tripuladas sejam tratadas como qualquer outra aeronave.

Apesar de possuírem um grande potencial para utilização em diversas áreas, abrangendo, por exemplo, aviação comercial, aplicações agrícolas e de segurança nacional, o VANT ainda é utilizado em missões muito específicas.

Muitos desses cuidados em limitar seu uso estão relacionados a questões ainda não totalmente respondidas. Um exemplo: em casos de falhas de comunicação, qual será o comportamento da aeronave? Como garantir a total ou parcial imunidade às falhas na comunicação estabelecida?

Diversos questionamentos como esses são continuamente discutidos pela escassez de estudos que identifiquem o nível de segurança crítica, possível de ser atingido por essas aeronaves.

Conhecer o impacto que uma falha tem em uma comunicação pode trazer grandes ganhos para a segurança e oferecer informações importantes para os esforços em normatizar voos realizados por aeronaves VANT.

A fim de auxiliar a responder a esses questionamentos, o trabalho realizado nesta Tese usa um ambiente para análises relativas às interferências ocasionadas por falhas, que impactam diretamente na segurança das comunicações de aeronaves VANT.

1.2. Objetivo

O objetivo desta Tese é apresentar uma avaliação sobre possíveis interferências ocasionadas por falhas em uma comunicação digital entre o ATCo (*Air Traffic Controller*), que se refere ao controle em terra, e uma aeronave VANT, utilizando o protocolo CPDLC (*Controller Pilot Data Link Communications*) como mecanismo de comunicação. Para esta avaliação é utilizada a técnica de injeção de falhas como forma de produzir as manipulações necessárias na comunicação.

A escolha do protocolo CPDLC para uso nesta proposta deve-se ao fato de ser uma tecnologia que utiliza a transmissão de dados digitais para comunicação no ambiente aeronáutico, possuindo uma estrutura de implementação já consolidada para o uso em aeronaves tripuladas.

A proposta de avaliação tem como objetivo analisar a integridade da comunicação estabelecida entre as partes por meio das interferências ocasionadas pelas falhas, e, também, analisar a segurança que a comunicação possui quando exposta a interferências. Sendo, aqui, a segurança diretamente relacionada à segurança crítica, que é utilizada em situações nas quais a exposição ao risco pode afetar diretamente a segurança de indivíduos, propriedade e meio ambiente.

De forma a atingir este objetivo, é utilizado um ambiente de simulação como forma de aferir os resultados propostos para as análises. Esse ambiente atende às especificações necessárias de um ambiente aeronáutico, possibilitando a troca de dados digitais, fazendo uso do protocolo IPv6.

1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

No Capítulo 2 é descrita a metodologia utilizada na pesquisa desta Tese. Os conceitos relevantes sobre Espaço Aéreo são apresentados no Capítulo 3, utilizando uma visão conceitual sobre o assunto. Já os conceitos referentes à Injeção de Falhas são abordados no Capítulo 4.

No Capítulo 5 descreve-se a plataforma utilizada para a realização dos ensaios propostos. A proposta central desta Tese é apresentada no Capítulo 6, sendo que os principais resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 7.

Finalmente, no Capítulo 8 são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos e as possibilidades para estudos futuros.

2. METODOLOGIA DA PESQUISA

“Metodologia: Assunto controverso, ainda não satisfatoriamente respondido, em qualquer campo do conhecimento, e que pode ser objeto de pesquisas científicas ou discussões acadêmicas”

Dicionário Houaiss da língua portuguesa, 1ª edição, 2001

"Na medida em que um enunciado científico se refere à realidade ele tem que ser falseável; na medida em que não é falseável, não se refere à realidade".

(POPPER, 1975)

Para Marconi e Lakatos (2003) a investigação científica se inicia quando se descobre que os conhecimentos existentes originários de crenças do senso comum, das teorias filosóficas ou científicas, são insuficientes e imponentes para explicar os problemas e as dúvidas que surgem em determinadas situações. Definem que o conhecimento científico não deve ser visto como um conhecimento empírico ou vulgar, mas sim, que deve ser entendido como um conhecimento adquirido de modo racional que se conduz por meio de conhecimentos científicos.

Segundo Ferrari (1974) o conhecimento científico possui características que o diferenciam dos demais tipos de conhecimentos existentes, de forma a classificá-lo e ser muito utilizado no âmbito das ciências formais. Estas características são (FERRARI, 1974):

- **É real**, por lidar com ocorrências ou fatos relacionados a alguma forma de existência que se manifesta de alguma maneira.
- **É contingente**, tendo veracidade ou falsidade em suas proposições ou hipóteses que são conhecidas por meio da experiência.
- **É sistemático**, por se tratar de um conhecimento ordenado logicamente onde se forma um sistema de ideias, teoria, e não por conhecimentos dispersos e desconexos.

- **Possui verificabilidade**, onde as afirmações, hipóteses, que não podem ser comprovadas não podem pertencer ao âmbito da ciência estudada.
- **É falível**, por não ser definitivo, absoluto ou final, por este motivo é aproximadamente exato onde as novas proposições de estudos e o desenvolvimento de novas técnicas podem reformular a teoria existente.

Para Bung e Navarra (1987) a necessidade de explicar a natureza das ocorrências de prováveis problemas em qualquer área é algo decorrente na natureza humana.

Para satisfazer esta necessidade, Bung considera que o método científico é a teoria da investigação, sendo utilizado para que diversas áreas possam responder a questões de “por que” ou “como” em relação às investigações de seus problemas (BUNG; NAVARRA, 1987).

A Figura 1 ilustra uma visão esquemática dessa teoria de investigação que propõe alcançar seus objetivos de uma forma científica.

Figura 1 – Esquemática para o Desenvolvimento de um Método (Fonte: Adaptado (MARCONI; LAKATOS, 2003))

Cada uma das etapas pode ser entendida como:

- **Problema ou lacuna:** a partir de um conjunto de conhecimentos existentes define-se o problema que deverá ser investigado. A partir desse ponto, define-se para a investigação proposta se já existe ou não uma resposta.

- **Colocação precisa do problema:** é definida a precisão do problema a ser investigado, podendo ser uma nova vertente ou um problema antigo que deve ser tratado com novos conhecimentos e técnicas.
- **Procura do conhecimento ou instrumentos relevantes:** considera-se fazer uma avaliação do conhecimento para possíveis tentativas de soluções do problema. Para isso podem ser consideradas as técnicas matemáticas, aparelhos de medições e dados empíricos.
- **Tentativa de solução:** nesse ponto define-se se os elementos identificados para a solução do problema são eficazes ou não. Sendo eficazes, segue-se para a comprovação, e caso não seja satisfatório segue-se para um novo levantamento de conhecimentos necessários para o problema.
- **Invenção de novas ideias ou produção de novos dados empíricos:** esta etapa é realizada somente quando a etapa de “Tentativa de solução” não for satisfatória. Neste momento deve-se refazer o levantamento de elementos que possam atender o objetivo da investigação para solução do problema.
- **Obtenção de uma solução:** tentativa de solução exata ou aproximada do problema com o auxílio do instrumental conceitual ou empírico disponíveis para a investigação.
- **Prova da solução:** é a comprovação, na qual é confrontada a solução com as teorias e informações empíricas. Se a investigação é dada como satisfatória encerra-se a pesquisa. E sendo não satisfatória, naturalmente inicia-se um novo ciclo onde são feitas as correções das hipóteses, teorias e os procedimentos ou dados utilizados.

Segundo Yin (2010) um projeto de pesquisa está relacionado à lógica que vincula os dados a serem coletados diretamente às questões iniciais do estudo. Para Yin, existe uma relação contínua entre as partes que devem ser consideradas durante todo o desenvolvimento da pesquisa, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Esquemática para o Desenvolvimento de um Método (Fonte: Adaptado (YIN, 2010))

Yin define cada elemento composto na figura como:

- **Plano:** identifica quais são as questões da pesquisa ou outras questões que justifique o estudo. Como entender os pontos fortes e as limitações inerentes ao assunto.
- **Projeto:** auxilia na definição da unidade de análise, desenvolve a teoria, as proposições e assuntos subjacentes ao estudo. Visa definir os procedimentos que mantenham a qualidade do estudo.
- **Preparação:** visa ampliar as habilidades do investigador em relação ao estudo e o especializa para o estudo de caso específico, desenvolve a conduta do estudo desejado.
- **Coleta:** nesse ponto, o investigador deve seguir a conduta definida no início do projeto, dispor de diversas fontes de evidências que convergem sobre os mesmos fatos, criar um banco de dados do estudo, além e manter um encadeamento de evidências.
- **Análise:** refere-se a considerar as técnicas analíticas com uso de dados quantitativos, qualitativos ou ambos. Consiste no exame, na tabulação, categorização ou testes, para que se possam formular conclusões acerca do

estudo realizado. A análise deve seguir uma estratégia de análise que possa definir o que e por que analisar.

- **Compartilhamento:** este elemento está relacionado diretamente em como disponibilizar o estudo para um foco específico de especialistas. Deve-se definir o público que se deseja alcançar, apresentar as evidências para que outros possam alcançar suas próprias conclusões, revisar e reescrever até que se alcance um alto nível de apresentação.

A pesquisa desta Tese foi desenvolvida de forma a responder as questões relevantes que se apresentaram como proposta à discussão do problema de interferência na comunicação via CPDLC.

Desta forma, a articulação entre o conteúdo teórico, técnicas instrumentais e premissas foram utilizadas para a construção de resultados que foram analisados para a validação da proposta da pesquisa.

Tendo claros os requisitos necessários que caracterizam e fundamentam o método científico para investigação, foi elaborado um estudo de revisão bibliográfica onde se apresentam as referências mais relevantes que dão suporte a este trabalho, como apresentado na Figura 3.

Demonstram-se, nessa figura os principais conjuntos de temas abrangidos por esta Tese, sendo que as referências conceituais apresentadas estão dispostas no decorrer do texto. Nesse contexto, ao definir o problema a ser investigado, as referências foram fundamentais para a elaboração dos aspectos fundamentais relacionados à elaboração da pesquisa.

No centro da figura apresenta-se a tematização da pesquisa que está relacionada aos cinco temas abordados durante o desenvolvimento desta Tese. Esses temas representam o imprescindível direcionamento de busca realizada durante o processo de revisão bibliográfica.

Em cada um dos temas são apresentadas as principais referências bibliográficas definidas como os principais documentos utilizados como base de conhecimento para a escrita dessa Tese.

Figura 3 – Fundamentos Teóricos para o Desenvolvimento da Proposta.

A pesquisa realizada para apresentar o estado-da-arte em que se encontra o tema proposto teve como principal base a IEEEExplore® Digital Library, que é utilizada atualmente para apresentação de diversos e importantes trabalhos na área de aviação em todo o mundo. Para a pesquisa foram utilizadas sequências que representam o contexto dessa Tese, compreendendo: *Aeronautical Communications Network*; *UAS Communication*; *UAS Integration*; *Non-segregated Airspace*; *ATN IPv6*; *ATN over IPv6*; *Fault Injection*; *Fault Injection Environment*; *Fault Injection Methods*; *Fixed Format CPDLC Messages*; *CPDLC Message Formats*; *CPDLC System*, *CPDLC* e *CPDLC Traffic Loads*.

Outras pesquisas relacionadas foram feitas em publicações disponíveis em periódicos como: *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*; *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*; *International Journal of Satellite Communications and Networking*; *Journal of Aircraft*.

Portanto, os elementos bibliográficos definiram a solidez conceitual da área de pesquisa, permitindo que a solução do problema fosse eficaz.

2.1. Considerações Finais deste Capítulo

Neste Capítulo foram apresentados os conceitos que cercam o uso da metodologia de pesquisa científica para o desenvolvimento de trabalhos científicos.

O uso da metodologia em trabalhos científicos visa fortalecer a base de conhecimentos necessários para que se possa obter, ao longo da escrita do trabalho, um relevante conteúdo bibliográfico que reflita o estado-da-arte sobre o tema proposto. Outra relevância do uso da metodologia está em elaborar como o projeto de pesquisa deve ser desenvolvido, ou seja, quais são as partes fundamentais que devem ser abordadas no texto para se seja possível refletir o objetivo do trabalho.

Como apresentado neste Capítulo, para esta Tese foi desenvolvida uma densa revisão bibliográfica, conforme pode ser observado no decorrer dos próximos Capítulos.

3. SISTEMAS E CONCEITOS SOBRE O ESPAÇO AÉREO

Neste Capítulo são apresentados os conceitos necessários relacionados ao ambiente aeronáutico. Conceitos estes que definem, atualmente, a visão de gestão do tráfego aéreo.

3.1. Sistema ATM Global

A ICAO (*International Civil Aviation Organization*), por meio do DOC 9854, definiu sete componentes para que ocorra a implementação dos Sistemas ATM (*Air Traffic Management*), tendo este documento sido incorporado integralmente às normas de Aviação Brasileira. Esses componentes estão presentes na Figura 4 (AERONÁUTICA, 2012), (ICAO, 2005). Essa figura ilustra o ambiente dos Sistemas ATM Global, composto por sete componentes, bem como a integração entre eles. Cada um desses componentes representa um conjunto de aplicações, apresentando a possibilidade de comunicação com todos os demais.

A ordem de apresentação nesta Figura 4 não implica em uma ordem de prioridade, mas visa demonstrar a importância do gerenciamento, da transmissão dos dados e das informações vitais para implantação dos Sistemas ATM. O Sistema ATM necessita ser desmembrado para que possa ser entendido o inter-relacionamento entre seus componentes.

Figura 4 – Representação dos Componentes do ATM Global (Fonte: (AERONÁUTICA, 2012)).

Estes sistemas são:

- Organização e Gerenciamento do Espaço Aéreo (AOM - *Airspace Organization and Management*): refere-se à organização global do espaço aéreo, baseando-se no contexto de acesso e igualdade, incluindo seu uso por VANT e outros veículos aéreos transitórios.
- Operações de Aeródromos (AO - *Aerodrome Operations*): refere-se à capacidade de fornecer informações estratégicas, normas e procedimentos relacionados à estruturação do espaço aéreo para que possam ser acomodados diferentes tipos de atividades aéreas, diferentes regras e condutas, o volume de tráfego e diferentes níveis de serviços.
- Balanceamento de Demanda e Capacidade (DCB – *Demand / Capacity Balancing*): visa minimizar os efeitos provocados pelas restrições do sistema ATM, sendo capaz de implementar ações em tempo hábil por meio da capacidade de avaliar os fluxos de todo o sistema de tráfego e sua capacidade.
- Sincronização do Tráfego (TS - *Traffic Synchronization*): refere-se a estabelecer a tática e manter a segurança, garantir a ordem e a eficiência do fluxo de tráfego aéreo. Estas características devem ser garantidas e oferecerão uma total integração por meio da sincronização de tráfego, gestão de demanda e conflitos, condições de equilíbrio.
- Gestão de Conflitos (CM - *Conflict Management*): limita o nível aceitável relacionado ao risco de colisão entre aeronaves e os perigos expostos.
- Operações dos Usuários do Espaço Aéreo (AUO - *Airspace User Operations*): refere-se a aspectos relacionados ao ATM em operações de voo, isto é, o sistema ATM deve acomodar diferentes tipos de missões de usuários do espaço aéreo. A aplicação desse componente não fica limitada a missões mais usuais, sendo aplicada, por exemplo, a voos destinados à agricultura e esportes, dentre outros.

- Gerenciamento de Prestação de Serviços ATM (ATMSDM - *ATM Service Delivery Management*): oferece serviços de gestão para consolidação de diversos tipos de serviços e processos que envolvam todas as fases de voo.

Para efeito desta Tese, os componentes diretamente ligados ao ambiente ATN (*Aeronautical Telecommunications Network*) proposto são a Organização e Gerenciamento do Espaço Aéreo (AOM) e a Gestão de Conflitos (CM).

3.2. Separação Mínima entre Aeronaves

A separação mínima entre aeronaves é exigida pelos órgãos normativos e está relacionada à segurança de voo e conseqüentemente ao risco de colisão que possa apresentar. Assim, relaciona-se diretamente com a questão de Gestão de Conflitos no ATM Global.

O nível mínimo de separação entre as aeronaves serve para evitar a iminente possibilidade de risco de colisão e também evitar que uma aeronave entre em uma área de turbulência provocada pela passagem de outra aeronave (OLIVEIRA, I. R. DE, 2003).

Um aspecto da operação diretamente relacionado com a separação mínima entre aeronaves diz respeito à ultrapassagem entre elas. No caso de aeronaves com direito de passagem, as mesmas devem se manter em velocidade e rumo determinados, garantindo as regras de separação mínima.

As aeronaves com direito de passagem também podem ser ultrapassadas por outras aeronaves. Nesses casos as aeronaves que desejam realizar a ultrapassagem devem realizar a aproximação por trás, em uma linha formando um ângulo inferior a 70 graus com o plano de simetria da aeronave a ser ultrapassada, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Representação do Ângulo de Ultrapassagem sendo Inferior a 70°.

Em regra, durante o procedimento de ultrapassagem, sendo subindo, descendo ou em voo nivelado, a aeronave deve modificar seu rumo à direita para manter-se fora da trajetória da aeronave a ser ultrapassada até que complete, integralmente, o procedimento de ultrapassagem (AERONÁUTICA, 1999).

A Figura 6 ilustra o trajeto que a aeronave que deseja ultrapassar deve seguir mantendo-se à direita até a finalização do procedimento, retornando à posição anterior.

Figura 6 – Representação da Ultrapassagem Mantendo-se a Direita.

Considerando todos os procedimentos em voo, as aeronaves devem evitar passagens por cima ou por baixo, além de evitar também cruzamentos pela frente, em casos de distâncias menores que o permitido (AERONÁUTICA, 1999), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Representação da Distância Mínima para Ultrapassagem.

A Figura 8 apresenta a visão dos requisitos de separação mínima entre aeronaves. Na figura, a jurisdição de origem como é o APP1 (*APProach Control 1*) e a jurisdição de destino o APP2. Os centros de controles de áreas são representados por ACC1 (*Area Control Center 1*) e ACC2 (*Area Control Center 2*), sendo o ACC1 responsável por navegação em cruzeiro próxima a área Terminal de Origem, enquanto o ACC2 é responsável pela navegação cruzeiro próxima a área Terminal de Destino (OLIVEIRA, I. R. DE, 2003).

Na Figura 8, as jurisdições (APP ou ACC) representam porções do espaço aéreo, sendo que cada porção é de responsabilidade de um centro de controle em terra, tendo como objetivo gerenciar todas as aeronaves que estejam em voo ou em solo na respectiva área de jurisdição, bem como manter contato com outras jurisdições para que possam receber ou disponibilizar informações de aeronaves que necessitem adentrar em suas zonas de controle.

Durante o voo, as aeronaves podem utilizar o espaço aéreo inferior ou o espaço aéreo superior, sendo o espaço aéreo inferior vai do nível do solo até o nível de voo 245 (FL245 inclusive) e o espaço aéreo superior que vai do nível de voo 245 (FL245 exclusive) até o limite máximo do espaço aéreo superior. O espaço aéreo superior comporta a chamada altitude de cruzeiro, que representa os níveis de voo utilizados pelas aeronaves em cruzeiro. Em ambos os espaços aéreos definidos (inferior e superior) são definidas as velocidades que as aeronaves podem utilizar, visando a separação mínima entre elas, que podem estar utilizando o mesmo nível de voo ou eventualmente possam ter seu nível de voo alterado.

A questão relativa a garantir a separação mínima das aeronaves também pode ser observada na Figura 8 por meio das linhas paralelas tracejadas. Trata-se das separações longitudinal e lateral, sendo as separações entre aeronaves expressas por tempo ou distância ao longo da rota (DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AEREO, 2002).

Para garantia de comunicação entre as aeronaves e os órgãos de controle responsáveis nas jurisdições, utilizam-se os serviços ATS (*Air Traffic Service*), que auxiliam as aeronaves em tempo real com informações que visam garantir de forma segura das operações.

Figura 8 – Representação dos Requisitos de Separação Mínima entre Aeronaves (Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, I. R. DE, 2003))

Outras definições importantes, também representadas na Figura 8 são (OLIVEIRA, I. R. DE, 2003):

- **Altitude de Cruzeiro:** refere-se à altitude de melhor rendimento quanto ao deslocamento da aeronave, devido à aerodinâmica e projeto de turbinas;
- **Separação na Decolagem:** requerida no momento da decolagem e durante a subida inicial, sendo definida pelo tempo de 1 a 3 minutos.
- **Separação Lateral e Longitudinal em Rota:** estas separações dependem da precisão dos equipamentos de auxílio à navegação que a aeronave estiver utilizando, bem como, da posição e da altitude relativa de cada aeronave e

das regras do espaço aéreo em que a aeronave estiver localizada. Geralmente utilizam-se separações que podem variar entre 15 e 200 NM¹.

- **Separação Horizontal na Aproximação:** esta separação é requerida em momentos que as aeronaves compartilham uma mesma Área Terminal, devendo sempre respeitar o mínimo de 5 NM de separação.

3.3. Rede de Telecomunicações Aeronáuticas (ATN)

The Aeronautical Telecommunications Network (ATN) is a global networking infrastructure that will "extend the information superhighway to the world of aviation." (FAA, 2010)

Durante as últimas décadas, os órgãos responsáveis por normatizar a comunicação e a infraestrutura aeronáutica para o mundo têm sido os seguintes:

- ICAO (*International Civil Aviation Organization*), cuja missão é elaborar trabalhos visando o desenvolvimento seguro e sustentável da aviação civil, por meio da cooperação entre os países membros (ICAO, 2013a),
- FAA (*Federal Aviation Administration*), que tem como missão fornecer um sistema aeroespacial seguro e eficiente ao espaço aéreo americano com a visão de alcançar o melhor nível de segurança crítica, eficiência, responsabilidade ambiental e liderança global (FAA, 2013), e
- EUROCONTROL cuja missão é garantir a segurança da navegação aérea para a Europa, reunindo em sua estrutura 39 Estados-Membros Europeus (EUROCONTROL, 2013).

Todos desenvolvem constantes trabalhos de pesquisas e elaboração de normas que orientam os diversos setores de aviação mundial, considerando as tendências em novas tecnologias e suas aplicações.

¹ *Nautical Miles* é a unidade de medida de comprimento ou distância, equivalente a 1852 m.

Todas as especificações e normas vigentes visam atender o novo conceito ATM Global para o desenvolvimento e integração das aplicações, como apresentado no início deste Capítulo.

A Rede de Telecomunicações Aeronáuticas (ATN) representa, atualmente, o mais completo e complexo nível de integração dos sistemas disponíveis para as operações aeronáuticas. Essa complexidade advém dos sistemas que compõem a estrutura disponível no uso da comunicação, sendo que, mesmo parcialmente, ainda são disponíveis sistemas legados para as operações. A rede ATN se trata de uma infraestrutura de rede que por meio de equipamentos com características específicas de funcionamento permite a transmissão de dados entre o controle em terra (ATCo) e as aeronaves. As características citadas referem-se a uso de protocolos, tabelas de roteamentos e transmissão dos dados.

A ATN representa, na aviação, um ambiente de sistemas integrados, nos quais se utilizam as mais recentes tecnologias, capazes de oferecer seus serviços de forma igualitária em todos os continentes.

Diversos países estão desenvolvendo ferramentas que atendam às especificações exigidas pela ICAO para integrarem suas operações no ambiente ATN. Essas especificações correspondem à infraestrutura de comunicação, que deve manter disponível a comunicação ar-terra, bem como operando sobre as diferentes redes de dados disponíveis para troca de mensagens (FAA, 2010).

3.3.1. Aplicação do Modelo TCP/IP na ATN

Em sua concepção original, a ATN usa, como referência para comunicação de dados, o Padrão ISO (*International Organization for Standardization*). Trata-se de uma arquitetura de referência para padronização de redes, que recebeu a denominação de Modelo de Referência para Interconexão de Sistemas Abertos (OSI) (GALLO; HANCOCK, 2003).

Baseia-se em uma proposta de um modelo que sintetizasse, de forma abstrata, o funcionamento de computadores que utilizassem redes de comunicação de dados. A Figura 9 ilustra a hierarquia das camadas para comunicação que é proposta por esse modelo.

Figura 9 – Representação da Arquitetura do Modelo OSI (Fonte: Adaptado de (KUROSE; ROSS, 2006), (FARREL, 2005)).

O sistema aberto representa os computadores emissores e receptores dos dados na rede e o sistema aberto retransmissor representa os equipamentos responsáveis pelo processamento de retransmissão dos dados, como por exemplo, os roteadores, responsáveis pela indicação de rotas a serem utilizadas pelos pacotes de dados. Outra característica que compõe o modelo são as camadas de 1 a 7 que executam, em cada nível, o envio dos dados para a camada superior.

As camadas componentes do modelo são: Camada 1 - Física, Camada 2 - Enlace, Camada 3 - Rede, Camada 4 - Transporte, Camada 5 - Sessão, Camada 6 - Apresentação e Camada 7 - Aplicação. Completando o modelo, há o meio físico de transmissão que representa a estrutura física que é disponibilizada para uso, como por exemplo, cabos de cobre, fibra óptica, entre outros.

No entanto, com o desenvolvimento de novas tecnologias, houve grande evolução na comunicação digital. Com isso, os órgãos normativos aeronáuticos iniciaram a adoção do novo modelo para representar a interconexão de redes, que é denominado como TCP/IP (*Transmission Control Protocolo / Internet Protocol*).

Este é um padrão acompanhado pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*), por meio de RFC (*Request For Comments*), com o objetivo de evoluir o padrão

anteriormente definido pela ISO. Essa evolução permite a comunicação de equipamentos produzidos por diferentes fabricantes. A Figura 10 ilustra a hierarquia de camadas do modelo TCP/IP e sua interconexão.

Figura 10 – Representação da Arquitetura do Modelo TCP/IP (Fonte: Adaptado de (KUROSE; ROSS, 2006), (FARREL, 2005).

Como no modelo OSI, o modelo TCP/IP possui as mesmas características para o sistema aberto, sistema aberto retransmissor e meio físico de transmissão. As mudanças fundamentais passam a ser nas camadas, que são definidas de 1 a 5, ou seja, as camadas Física, Enlace, Rede, Transporte e Aplicação, respectivamente.

Fundamentalmente este modelo traz a possibilidade de desenvolver novos protocolos em suas camadas. As camadas 1, 2 e 5 são semelhantes às camadas do modelo OSI. As mudanças ocorrem nas camadas 3 e 4 que se referem à transmissão dos dados digitais que pode ser realizada por equipamentos de diferentes fabricantes, o que possibilita uma maior versatilidade de projetos em infraestrutura e disponibilidade de novas aplicações.

Visando acompanhar o desenvolvimento provido pelas novas tecnologias que adotaram o uso do modelo TCP/IP, o conceito para transferência de dados no ambiente aeronáutico passou a fazer uso da transmissão digital de dados por meio da suíte IP (*Internet Protocol*).

Em seus estudos Netto e Khanna (2003) apresentam as possibilidades de uso do modelo TCP/IP no ambiente aeronáutico, apresentando suas vantagens quanto ao

uso de novas aplicações para ATN. Outra relevância está associada aos benefícios deste modelo em conjunto com o protocolo IPv6 (*Internet Protocol version 6*).

Para esta Tese utiliza-se a camada de aplicação, que permite a comunicação entre os aplicativos, sendo que os dados transmitidos são codificados no padrão do protocolo utilizado, que para este trabalho é o protocolo CPDLC (*Controller Pilot Data Link Communications*).

3.3.2. Transmissão de Dados em ATN

“Real success in ATM automation can only be achieved when aircraft-based computer systems are designed and implemented as data processing and networking peers to their respective ground-based computers, rather than continuing in their current role as independent processors, functioning in parallel, but with little data sharing with ground-based hosts”.(ICAO, 1999a)

O uso de transmissão de dados digitais por meio da ATN (*Aeronautical Telecommunications Network*) visa melhorar o nível de serviço proposto na utilização dos Sistemas ATM (*Air Traffic Management*) (BARTH *et al.*, 2008).

Em seu trabalho Barth *et al.* (2008) defende a utilização da transmissão de dados digitais em todas as fases do voo, provendo um serviço coordenado entre os sistemas, e, desta forma, disponibilizando, a todos os usuários, informações seguras e de alta qualidade.

Desde suas primeiras publicações, a ICAO define alguns benefícios apresentados para o uso das transmissões digitais no ambiente ATN, como seguem (ICAO, 1999a):

- Melhor clareza na comunicação, resultando em redução de erros de interpretação;
- Utilização mais eficiente dos canais de comunicação, reduzindo o uso do canal de voz ar-terra;

- Possibilidade de conectar usuários finais (ar-terra) em um único ambiente de dados, mais especificamente, na rede internacional específica para a troca de dados entre aeronaves;
- Redução da carga de trabalho dos profissionais (pilotos, controladores, e outros) envolvidos nos Sistemas ATM ao momento que utilizam mensagens pré-formatadas; e,
- Redução de equipamentos e aplicações que atendam aos sistemas de comunicação.

Esse mecanismo de comunicação digital, inserido na ATN é disposto em um ambiente homogêneo no que tange à disponibilidade de serviços, visando proporcionar uma melhor integração e capacidade de comunicação entre os sistemas ar-terra e terra-terra (BAI *et al.*, 2006).

O endereçamento para transmissão de dados na ATN é estabelecido para atender à variedade de dados que são transmitidos continuamente, entre os órgãos ATS (*Air Traffic Service*), usuários nacionais e internacionais do espaço aéreo, comunicações aeronáuticas internacionais como a rede AFTM (*Aeronautical Fixed Telecommunications Network*) (ICAO, 1999a).

Esse endereçamento refere-se ao caminho estabelecido para comunicação entre as aplicações em terra e em ar, que são os sistemas embarcados existentes nas aeronaves.

O ambiente para a transmissão dos dados considera a identificação das aeronaves, utilizando seu endereçamento lógico, sendo composto por diversas redes e sub-redes de comunicação, as quais usam equipamentos específicos. Esse endereçamento fornece a identificação da aeronave aos sistemas que é utilizada no envio de mensagens de controle entre a aeronave e o ATCo utilizando a ATN.

Outra característica refere-se à especificação do tamanho do pacote de dados para realizar a transmissão dos dados, utilizando a ATN, por meio de seus endereçamentos.

O valor para o parâmetro de endereçamento da aeronave deve seguir o definido pela ICAO, com tamanho de 24 bits por aeronave (ICAO, 2010). Para o envio e recebimento dos dados, o pacote necessita transmitir informações que identifiquem, por exemplo, qual tipo de aplicação está sendo utilizada, qual o tipo de comunicação está estabelecida, e informações sobre a fragmentação do pacote, entre outras.

A Figura 11 ilustra a estrutura do pacote de dados para endereçamento, sendo:

- O campo **ATNPKT Version** informa a versão da especificação que está sendo utilizada, composto por 4 bits.
- O campo **DS Primitive** informa qual a primitiva que está sendo utilizada para a comunicação, composto por 4 bits.
- O campo **App Tech Type** informa qual a aplicação sobre a ATN está sendo utilizada na comunicação, composto por 3 bits.
- O campo **more** informa a fragmentação do pacote, ou seja, a divisão do pacote para transmissão na rede, composto por 1 bit.
- O campo **Presence Flags** traz especificados quais os dados contêm a parte variável, composto por 12 bits.

Figura 11 – Tamanho do Pacote de Dados para Endereçamento ATN (Fonte:(ICAO, 2011))

3.3.3. IPv6 para Transmissão de Dados em ATN.

O uso desse novo protocolo para a comunicação entre redes de computadores é uma necessidade por oferecer uma maior quantidade de numeração IP (*Internet Protocol*). Visando atender essa necessidade o IETF (*Internet Engineering Task*

Force) desempenhou esforços para uma nova proposta que atendesse a atual demanda, dando origem a uma nova *suíte* de IPs denominada IPv6 (*Internet Protocol version 6*) (FARREL, 2005).

No ano de 2005 a FAA realizou a publicação de documentos relacionados à importância do uso do padrão TCP/IP para o ambiente aeronáutico, incluindo o protocolo IPv6 para uso na camada de rede. Um importante recurso desse protocolo é o NSAP (*Network Service Access Point*) o qual se refere a um formato de endereçamento generalizado para uso em diversas redes, conforme definido pela ISO. Esse formato é utilizado para o roteamento na ATN (ICAO, 2009). O uso do NSAP faz com que não seja necessário readequar o tamanho do pacote de dados transmitido por meio do protocolo CPDLC.

A proposta de uso do protocolo IPv6 oferece uma nova visão para as comunicações aeronáuticas, não somente atendendo às exigências impostas pela evolução tecnológica, mas também conseguindo oferecer um ambiente com um maior nível de segurança.

Uma vez que esse protocolo trabalha na camada de rede, as aplicações não sofrem interferência no que diz respeito às exigências para seus desenvolvimentos. A Tabela 1 ilustra um comparativo entre as aplicações que usam o conceito inicial de transmissão de dados em ATN com protocolos específicos e a sua transmissão utilizando o protocolo IPv6.

Vale a pena ressaltar que o foco desta Tese está no Gerenciamento do Tráfego Aéreo (primeira linha da tabela 1). As demais categorias de aplicação contidas nessa tabela não são foco deste trabalho. Para exemplificar, uma interferência na questão da Comunicação Administrativa se constitui em um problema de segurança de dados, não interferindo diretamente na segurança crítica de um voo.

Tabela 1- Comparação de Disponibilidade dos Serviços das Aplicações com Uso do TCP/IP (Fonte: Adaptado de (DHAS *et al.*, 2000)).

Categoria da Aplicação	ATN	ATN com TCP/IP
Gerenciamento de Tráfego Aéreo: 1. Controle de Tráfego Aéreo 2. Serviços de tráfego Aéreo 3. Comunicação, Vigilância e Navegação	Sim	Sim
Controle Operacional de Linhas Aéreas: 1. Sistemas de Controle 2. Operações de Voo 3. Manutenção 4. Operações de Aeroporto/Rampa	Sim	Sim
Comunicação Administrativa de Linhas Aéreas	Sim	Sim
Comunicação de Passageiros de Linhas Aéreas	Não	Sim
Entretenimento	Não	Sim

Nesse comparativo pode ser evidenciado que aplicações disponibilizadas para os usuários do transporte aéreo são as principais beneficiadas no uso da ATN com TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Para as demais aplicações, utilizadas no Controle de Tráfego Aéreo, não são necessárias alterações de codificação para que possam utilizar a transmissão de seus dados por meio do protocolo.

Em relação à arquitetura física utilizada pela ATN, a comunicação passa a ter o protocolo como mecanismo de roteamento entre os sistemas finais, nas respectivas redes. A Figura 12 ilustra o modelo de arquitetura usando o protocolo IPv6 como mecanismo de comunicação.

Figura 12 – Arquitetura ATN com o Uso do Protocolo IPv6 (Fonte: Adaptado de (NETTO; KHANNA, 2003))

Ao momento em que é estabelecida a comunicação entre aeronave e terra inicia-se a troca de mensagens que perdura durante toda a trajetória de voo. Na arquitetura, os roteadores e subredes são os mecanismos físicos responsáveis em permitir o tráfego de informações entre ambos. A aplicação a ser utilizada pode tanto estar em terra, quanto na aeronave.

3.3.4. Mecanismo de Comunicação CPDLC

"The problems with frequency congestion are real and very significant. By using the clear and highly efficient communications available to us through Data Link, we will all benefit from a system that has greater throughput while we maintain the highest possible levels of safety."

(Jack Olcott, President, National Business Aviation Association)

O protocolo CPDLC (*Controller-Pilot Data Link Communications*) compõe uma gama de novas aplicações tecnológicas (ROCHA, 2010), (HAMRICK; MILLS, 2002) inicialmente representadas por meio do conceito CNS/ATM (*Communication, Navigation and Surveillance / Air Traffic Management*) para melhor controle do espaço aéreo.

De acordo com Hamrick e Mills (2002) o tamanho fixo das mensagens transmitidas por meio do CPDLC favorece a comunicação ar-terra, permitindo que os órgãos ATS (*Air Traffic Service*) respondam rapidamente a uma solicitação de mudança referente ao plano de voo, mantendo a separação mínima entre as aeronaves e evitando assim uma possível colisão.

Em estudos apresentados pelo MITRE são destacadas as principais contribuições no uso do Protocolo CPDLC para o tráfego aéreo, como sendo, ajuda nas rotinas de *off-load* (descargas), não perda de tempo em trocas críticas dos mecanismos de comunicação de dados e voz em casos necessários (por exemplo, *handoffs* - troca do tipo de comunicação que está sendo utilizado), liberação do canal de voz para comunicações críticas como solicitações de informações meteorológicas e sobre o tráfego existente (MITRE CORPORATION, 2008).

Como definido na seção 3.3.2 desta Tese, a transferência de informações utiliza uma especificação relacionada ao tamanho do pacote de dados para comunicação por meio das aplicações ATN. Desta forma, o protocolo CPDLC utiliza essa mesma especificação para compor esse conjunto de aplicações, e, utilizando uma comunicação bilateral, estabelece a comunicação ar-terra.

O protocolo CPDLC possui uma estrutura funcional para fornecer os serviços de comunicação, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Representação Funcional da Aplicação CPDLC. (Fonte: (ICAO, 2010))

Nesta figura são apresentados os elementos necessários para a comunicação, sendo:

- O **CPDLC-air-user** (ou CPDLC-ground-user): é a parte operacional da aplicação CPDLC. Esse elemento não executa a comunicação, mas depende do serviço oferecido pela *interface CPDLC- application entity* para ser executada.
- O **CPDLC- application entity (CPDLC-AE)**: consiste de vários elementos, incluindo o *CPDLC-application service element* e o *CPDLC-control function*.
- O **CPDLC- application service element (CPDLC-ASE)**: é o elemento do sistema de comunicação que executa o protocolo *CPDLC-specific*.
- O **CPDLC-control function (CPDLC-CF)**: responsável pelo mapeamento de serviços de uma primitiva recebida por um determinado serviço (como, o *CPDLC-ASE* e o *CPDLC-air-user*) para primitivas de serviços de outros elementos.

O protocolo CPDLC é um mecanismo de grande importância para a comunicação entre a aeronave e seu controle em terra, sendo que interferências causadas por falhas em mensagens podem ser inseridas no corpo de uma mensagem autorizada, podendo oferecer riscos que possivelmente não sejam esperados.

Portanto, analisar as interferências causadas por falhas em uma comunicação CPDLC deve ser considerado como um importante ponto para garantir o menor risco no uso de aeronaves VANT.

Por exemplo, considerar as falhas decorrentes de alterações nos conteúdos das mensagens, traz uma combinação de possíveis consequências que a tecnologia empregada nas partes envolvidas da comunicação podem não apresentar com a precisão desejada.

Além disso, a análise de interferências provocadas pelas falhas pode, de forma indireta, contribuir para a elaboração de padrões de riscos em falhas de comunicações aeronáuticas.

3.4. Aeronaves VANT (Veículo Aéreo não Tripulado)

A expansão de mercado em conjunto com as novas tecnologias disponíveis geraram novas possibilidades e exigências para a aviação. Dessa forma, a partir da Primeira Guerra Mundial, após o ano de 1916, começaram os desenvolvimentos de projetos envolvendo aeronaves remotamente controladas (AVIATIONKNOWLEDGE, 2012). Essas aeronaves são definidas no Brasil pelo nome de Veículo Aéreo não Tripulado – VANT, que se trata da tradução de seu nome comumente conhecido nos Estados Unidos (*Unmanned Aerial Vehicle* – UAV).

Considerando os avanços relacionados ao desenvolvimento de aeronaves, pode-se considerar que, a partir da década de 50, com o início do uso das turbinas a jato, foram desenvolvidos projetos nos quais as tecnologias utilizadas demonstraram a capacidade de adequações às necessidades impostas pelo mercado da aviação mundial.

A aeronave VANT é projetada para operar sem piloto a bordo, ou seja, sua operação deve ser feita por um piloto em uma estação remota de pilotagem em terra, o que a caracteriza como uma ARP (Aeronave Remotamente Pilotada) ou de forma indireta, por programação (autônoma), o que a caracteriza como uma aeronave VANT (DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AEREO, 2010).

Para a ICAO o uso dessas aeronaves pode ser dividido em duas categorias: a comercial e a governamental (TAYLOR, 2010). A Figura 14 ilustra cada categoria e suas derivações de uso.

Figura 14 – Divisão de Categorias para Uso de Aeronaves VANT (Fonte: (TAYLOR, 2010))

Cada uma dessas categorias representa, parcialmente, os serviços essenciais nos quais uma aeronave VANT pode trabalhar. Para a categoria comercial são alocadas áreas de serviços direcionados para uso de empresas ou usuários civis. Na categoria governamental são alocadas áreas que representam serviços relacionados à segurança nacional e ao apoio a demais estruturas civis.

Atualmente, a comunicação entre uma aeronave não tripulada e o solo é realizada por meio de Estação Piloto disponível nas operações. Essas estações contam com equipamentos específicos para estabelecer a comunicação entre a aeronave e o piloto responsável por sua condução.

Outros elementos importantes para realização de operações com aeronaves não tripuladas compõem o conjunto de sistemas disponíveis nas estações, como, Link de Comunicação, Sistema de Lançamento e o Sistema de Recuperação, como representados pelas Figuras 15 a 17, respectivamente. Por meio da Estação Piloto, o piloto em terra pode controlar ou acompanhar o voo da aeronave em operação.

Figura 15 – Arquitetura de Comunicação Atual para Aeronaves VANT, utilizando o Link de Comunicação.

O sistema de lançamento é utilizado no início da operação para que a aeronave seja colocada em voo. Por meio de seus sistemas é iniciada a decolagem que depois passa a ser controlada durante o período da operação. A Figura 16 ilustra o uso do sistema de lançamento da aeronave.

Figura 16 – Representação do Sistema de Lançamento de Aeronaves VANT.

Durante a operação de uma aeronave controlada é necessário informar aos órgãos responsáveis qual o espaço aéreo que deve ser utilizado, isto é, em quais níveis de voo as aeronaves estarão e em qual delimitação geográfica ocorrerão esses voos.

Iniciado o voo a aeronave deve se manter dentro das limitações que foram definidas e autorizadas. Em situações nas quais a aeronave se afasta das limitações determinadas é utilizado o sistema de recuperação para auxiliar no retorno da aeronave para a área de voo autorizada. O sistema de recuperação deve ser acionado pelo piloto que está no controle da operação. A Figura 17 ilustra o uso do sistema de recuperação durante o voo.

Figura 17 – Representação do Sistema de Recuperação de Aeronaves VANT.

Nesta Tese, a arquitetura de comunicação proposta utiliza a comunicação ar-terra disponível para aeronaves com autorização de uso do espaço aéreo. Trata-se do protocolo CPDLC, utilizado para troca de mensagens de forma digital entre aeronaves VANT e o ATCo.

O ATCo tem a responsabilidade de manter as aeronaves em condições de voo por meio da separação mínima entre as mesmas, ou seja, prover um fluxo ordenado no

espaço aéreo. Utiliza informações recebidas por meio dos sistemas de controle para que possa analisar quais decisões devem ser tomadas e então informar as aeronaves sobre os procedimentos de segurança necessários, a fim de evitar possíveis colisões e esteiras de turbulência (ICAO, 2000).

A Figura 18 ilustra como ocorre a comunicação com o protocolo CPDLC. Neste cenário o ATCo monitora o voo de uma aeronave VANT, utilizando as mesmas aplicações que atualmente realizam o monitoramento de aeronaves tripuladas, podendo também realizar a troca de mensagens digitais com a aeronave.

Figura 18 – Arquitetura de Comunicação Usando CPDLC.

Nesta arquitetura, a comunicação realizada entre as aeronaves e o ATCo utiliza um link de dados digitais pelo qual são transmitidas as mensagens CPDLC. As informações de vigilância das aeronaves são transmitidas utilizando os serviços ADS (*Automatic Dependent Surveillance*), serviço normalmente disponível nas aeronaves para informação constante sobre sua localização. Vale ressaltar, que nesta Tese não é modelado o serviço ADS, tendo como premissa apenas que o serviço já está disponível na aeronave.

O ATCo, por sua vez, de posse das informações de vigilância e a condição de troca de mensagens pode monitorar as aeronaves que estejam sob sua jurisdição.

Uma vez estabelecida a comunicação entre as partes, as mensagens são enviadas e recebidas automaticamente com o uso dos serviços. Nesse momento as mensagens são tratadas de forma automática pela aeronave, que deve receber a mensagem e realizar a interpretação dos dados contidos na mesma.

Um fator de risco apresentado nesse cenário, e que deve ser questionado, refere-se ao grau de integridade com que os dados são apresentados na comunicação. Devem ser considerados casos em que as interferências geradas pelas falhas podem colocar em risco a aeronave VANT, por exemplo, em casos de voo sobre regiões habitadas, sendo que a ausência de uma análise a priori dessas interferências prejudica a tomada de decisões em casos emergenciais.

Cabe ressaltar que, ao trabalhar com um sistema autônomo, é desejável que esse esteja preparado para responder a um nível maior de exposição ao risco, e considerando que o sistema autônomo é um sistema crítico no que se refere à segurança, são geradas outras necessidades referentes à garantia de tempo de resposta nas operações.

Dessa forma, a arquitetura de comunicação passa a trabalhar com interferências que podem não ser conhecidas, podendo também não ser interpretadas a contento. Assim, torna-se relevante uma análise sobre os impactos das interferências geradas por falhas no sistema.

3.5. Considerações Finais deste Capítulo

Nos últimos anos, a demanda de voos teve um crescimento considerável e com este crescimento a necessidade de tecnologias que auxiliem cada vez mais o fluxo contínuo e seguro do tráfego aéreo. Segundo a ICAO o crescimento para o ano de 2012 foi de 12% (ICAO, 2013b).

Conforme apresentado neste Capítulo, o contínuo desenvolvimento e o uso de novas tecnologias no setor aéreo tem o potencial de proporcionar um ambiente mais estável, que, conseqüentemente gera um melhor grau de confiança por parte da sociedade, o que envolve diretamente os conceitos sob a óptica do Sistema ATM Global.

Com todo o crescimento no setor, assegurar que o espaço aéreo comporte um maior número de aeronaves, assegurando menor risco de acidentes passa a ser um tópico importante para as pesquisas acadêmicas desenvolvidas. As questões abordadas neste Capítulo, relativas a separação mínima, o uso de um protocolo de nova geração (IPv6), bem como o uso do protocolo CPDLC para transmissão de dados digitais são questões que necessitam ser analisadas e exaustivamente discutidas entre as entidades acadêmicas e normativas.

Neste Capítulo é apresentado um novo conceito de aeronaves, ou seja, o VANT é um assunto cada vez mais discutido quanto ao seu uso de forma comercial.

Todos os conceitos discutidos no decorrer deste Capítulo são aplicados diretamente no ambiente de simulação utilizado para validar a proposta desta Tese.

4. CARACTERÍSTICAS DE UM AMBIENTE DE INJEÇÃO DE FALHAS

O crescente desenvolvimento de ambientes que propiciam o uso de novas tecnologias representa desafios, notadamente quando há o problema de que se deve ter a certeza de operação do serviço oferecido. Esses ambientes, muitas vezes híbridos (utilizam diversas tecnologias), disponibilizam um grande número de alternativas baseadas em suíte IP (*Internet Protocol*). Uma constante atenção que permeia esse ambiente refere-se a questões de possibilidade de falhas que possam degradar os serviços disponibilizados.

Como forma de minimizar as constantes preocupações que advêm do uso de novas tecnologias, as técnicas relacionadas à injeção de falhas, por meio de simulações, podem produzir resultados que avaliem a capacidade operacional do serviço no ambiente.

A capacidade operacional também se relaciona com a disponibilidade dos serviços, uma vez que estes devem estar disponíveis de forma contínua. Esta disponibilidade também está ligada ao quesito de segurança crítica do ambiente onde a aeronave está inserida, por operar em um sistema no qual um erro operacional pode acarretar danos em vários níveis.

Desde a década de 1970 são utilizadas técnicas de injeção de falhas para realizar análises em sistemas críticos como, por exemplo, os dispostos no ambiente aeronáutico. Anos após, começou então a ser utilizada em estudos de propagação de erros e também com objetivo de dispor novas formas de detecção de falhas (DREBES, 2005).

Para esta Tese foi escolhida técnica de injeção de falhas por proporcionar o ambiente e os resultados necessários para a validação da proposta. A técnica realiza uma alteração no conteúdo da mensagem a ser transmitida sem interferir nos dados inerentes às informações de origem e destino da transmissão. Por se tratar de uma técnica que não necessita de uma complexa implementação para que possa

ser utilizada, atende os requisitos exigidos para análise e validação dos resultados aqui apresentados.

4.1. Componentes de um Ambiente de Simulação

As técnicas utilizadas estão diretamente relacionadas aos requisitos de dependabilidade, que é a forma de analisar o comportamento de um sistema em relação a suportar falhas, traduzindo a capacidade de um sistema entregar seus serviços de forma confiável. Essa capacidade está diretamente relacionada à percepção que o usuário tem do sistema, por meio de sua interface, independente de qual tipo de sistema esteja sendo utilizado (VERMA *et al.*, 2011).

Segundo Avizienis *et. al.* (2001), uma falha ocorre quando um serviço prestado não atinge seu objetivo. Assim, uma falha pode ser caracterizada como sendo a transição de um determinado serviço que deveria ser entregue de forma correta para um serviço incorreto, quando sua função passa a não ser mais realizada.

A ocorrência de falha (manifestação externa) em um sistema está relacionada diretamente a um erro (estado interno), ou seja, um erro pode levar o sistema a gerar uma subsequente falha (AVIZIENIS, ALGIRDAS *et al.*, 2001), (AVIZIENIS, A. *et al.*, 2004).

Avizienis (2001) apresenta a possibilidade da utilização de critérios que analisem a qualidade do serviço, visando evitar as falhas mais frequentes, permitindo uma redução no tempo de interrupções do sistema. Tal característica pode ser obtida com o uso da simulação do sistema alvo, aliado à injeção de falhas, conforme proposta desta Tese.

Segundo Dawson *et. al.* (1996) o modelo de falhas determina o cenário de falhas que se utiliza. O cenário, em relação ao injetor de falhas, reflete as características relacionadas à aplicação no uso da comunicação, isto é, como são processadas e selecionadas as mensagens (DAWSON *et al.*, 1996).

A Figura 19 ilustra os componentes pertencentes a um ambiente de simulação para realizar a injeção de falhas. Cada componente do ambiente possui uma função específica, podendo ser implementados separadamente em relação à utilização e execução dos serviços propostos (HSUEH *et al.*, 1997).

Figura 19 – Componentes para um ambiente de simulação (Fonte: Adaptado (HSUEH *et al.*, 1997)).

Nesse ambiente, o Injetor de Falhas realiza a injeção de falhas no Sistema Alvo, que por sua vez executa comandos enviados pelo Gerador de Carga de Trabalho. Um Injetor de Falhas é implementado para inserir diversos tipos de falhas, tais como, falhas locais e falhas de temporização, seja por meio do hardware, seja por meio do software. O Monitor realiza acompanhamento contínuo dos comandos executados e faz a coleta de dados. O Coletor de Dados realiza a coleta dos dados de forma on-line, enquanto que o Analisador de Dados realiza o processamento para análise desses dados. O controle do ambiente é realizado por meio do Controlador, que pode ser executado diretamente no Sistema alvo ou em um hardware separado. A Biblioteka de Falhas é definida para permitir maior portabilidade e flexibilidade no ambiente (HSUEH *et al.*, 1997).

Existem duas categorias ou técnicas principais no que se refere à injeção de falhas: a primeira técnica opera por meio de simulação de sistemas, e a segunda por meio da injeção de falhas em sistemas físicos (EJLALI *et al.*, 2003).

A injeção de falhas por meio de simulação em um determinado ambiente de *software* (EJLALI *et al.*, 2003), baseia-se em falhas cuja abordagem ocorre em diferentes níveis de abstração e uso de diferentes linguagens. Este ambiente é caracterizado pela interoperabilidade nos níveis de abstração e, validação no processo de projeto.

A injeção de falhas físicas caracteriza-se por falhas injetadas no hardware dos sistemas (MARTINEZ *et al.*, 1999). Nesta categoria, a injeção de falhas baseia-se na implementação de um hardware que deve ser utilizado para injetar as falhas diretamente no sistema desejado. Neste âmbito é utilizada a injeção baseada em hardware por contato físico ou a injeção por meio de hardware sem contato físico (ZUMALDE, 2011), (HSUEH *et al.*, 1997).

4.2. O Uso da Injeção de Falhas em Redes de Computadores

Com a expansão no uso de redes de computadores em diversos segmentos cresceu também a necessidade de garantir a capacidade de processamento de informações em ambientes distintos e a capacidade de disponibilizar os serviços em menor tempo possível.

Atualmente, em muitos casos, um ambiente de redes de computadores pode ser caracterizado por sua complexidade, no qual estão envolvidos diversos mecanismos físicos para estabelecer a comunicação entre os sistemas finais. Estes sistemas finais são comumente conhecidos como aplicações computacionais, as quais são responsáveis por execução de serviços dos mais diversos tipos e finalidades.

Como forma de transmissão de informações em modo digital, uma rede de computadores utiliza o conceito de envio de pacotes IP (*Internet Protocol*), são transformados em datagramas² para que possam ser transportados logicamente pela rede (KUROSE; ROSS, 2009), (TANENBAUM ANDREW S., 2003).

² Datagrama é a unidade básica de transferência associada à fragmentação de pacotes em uma rede de computadores.

O processo de transmissão de pacotes IP em uma rede pressupõe que o envio seja feito por meio de interconexões que utilizam ativos de rede, como, roteadores³ e *switches*⁴.

Durante esse processo de transmissão dos pacotes, a capacidade de envio dos dados entre os sistemas finais pode ser reduzida, resultando em atrasos no envio dos dados. Os atrasos mais significativos, quando relacionados ao desempenho de uma rede são: atraso de processamento, atraso do processamento nodal, atraso de fila, atraso de transmissão, e atraso de propagação, conforme detalhado a seguir (GALLO; HANCOCK, 2003):

- O atraso de processamento é determinado pelo tempo gasto para a análise realizada no cabeçalho do pacote.
- O atraso do processamento nodal é caracterizado pela chegada de um pacote a um roteador, que, após análise do cabeçalho do pacote determina qual o melhor enlace de saída. Ao determinar o melhor enlace de saída o pacote é direcionado para este e fica aguardando o envio.
- O atraso de fila é o tempo gasto pelo pacote enquanto aguarda seu envio por um determinado enlace.
- O atraso de transmissão é o tempo gasto para envio de todos os bits⁵ do pacote para um determinado enlace.
- O atraso de propagação é caracterizado pelo tempo gasto por um bit após o mesmo ter sua transmissão iniciada no enlace até o momento que chega ao enlace de destino, ou seja, que atinge o roteador destino.

A Figura 20 ilustra a transmissão de pacotes em uma rede e o momento em que estes pacotes são recebidos pela rede, entrando em um buffer (fila de saída) para aguardar o momento de serem enviados a um determinado enlace de saída.

³ Roteador é um equipamento utilizado para realizar a comutação de protocolos em diferentes redes.

⁴ Switch é um equipamento utilizado para encaminhar pacotes IPs em um ambiente interno de redes.

⁵ Bit é a menor unidade de transmissão em comunicação digital.

Figura 20 – Representação de Transmissão de Pacotes em uma Rede.

A possibilidade de interrupção de serviço somente ocorre em situações extremas de atrasos. Nesse caso os pacotes podem ser perdidos, ou seja, não entregues ao destino final da comunicação.

4.3. Considerações Finais deste Capítulo

Neste Capítulo são apresentadas as características inerentes a técnicas de injeção de falhas em um ambiente de transmissão de dados digitais. O uso da técnica de injeção de falhas controladas para observar o comportamento de um determinado ambiente auxilia no conhecimento prévio das possíveis reações de um ambiente exposto a situações de risco.

Para esta Tese, a técnica de injeção de falhas é aplicada diretamente com o uso do Modulo de Falha ATN, o qual é apresentado no Capítulo 6.

5. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA ENSAIOS DE SISTEMAS EMBARCADOS CRÍTICOS

A plataforma PlpE-SEC é um conjunto de aplicações e bibliotecas que permitem a execução de experimentos integrados à rede IVAO (*International Virtual Aviation Organization*), juntamente com simuladores de voo como o *Flight Simulator* e *Flight Gear*, e também com algoritmos que implementam tecnologias relacionadas ao conceito CNS/ATM (*Communication, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management*) (GIL, F. DE O. *et al.*, 2009) (GIL, F. *et al.*, 2010). Deve-se frisar que para a simulação utilizada e descrita no Capítulo 6, não foi necessário o uso nem da rede IVAO, nem dos simuladores aqui citados.

Em seu trabalho Gil *et. al.* (2009), atribui a importância da plataforma em relação à possibilidade de realizar ensaios envolvendo VANT, por considerar não apenas os modelos computacionais, mas também por suas características físicas que podem ser também ser modeladas e simuladas na plataforma. Para ambos os modelos é utilizado o conceito de “*Hardware In the Loop*” (HIL) e o conceito de “*Human in the Loop*”, o que a torna eficaz para os estudos e implementações realizados em sistemas embarcados.

A Figura 21 ilustra como os elementos pertencentes ao ambiente de simulação são distribuídos em módulos que se integram e podem trabalhar em conjunto no ambiente simulado.

Figura 21 – Representação da Integração dos Módulos do Ambiente de Simulação.

Os módulos presentes na Figura 21 são responsáveis por fazerem do ambiente simulado um ambiente integrado, no qual cada um desses módulos pode ser acionado para executar uma tarefa específica no ambiente ou trabalhar em conjunto com os demais módulos.

A plataforma representa o núcleo central do ambiente, no qual os módulos são integrados e se comunicam por meio do envio e recebimento de mensagens.

A ligação entre o Módulo Virtual UAV e o Módulo CPDLC - é utilizada para receber automaticamente as mensagens de controle que devem ser reconhecidas pelos sistemas de bordo.

O Módulo CPDLC realiza a simulação referente ao envio e recebimento de mensagens entre a aeronave e o ATCo. Por meio da comunicação realizada por esse módulo, o Módulo de Falha ATN realiza a injeção de falhas para que sejam analisadas as interferências ocorridas na comunicação.

O Módulo Virtual UAV virtual simula as condições de voo de uma aeronave não tripulada.

A Conexão com Simuladores e Componentes Externos auxiliam a plataforma com informações sobre aeronaves em voo utilizando os simuladores externos, como por exemplo o *FSX* e o *Fligth Gear*, e também utilizando API's para que aplicações externas possam se comunicar com a plataforma.

A Figura 22 ilustra a arquitetura proposta para o ambiente de simulação em questão. Nesta arquitetura estão representados os elementos que compõem o espaço aéreo e os núcleos que possibilitam as comunicações necessárias entre os mesmos.

Figura 22 – Arquitetura Funcional do Ambiente de Simulação (Fonte: Adaptado (GIL, F. DE O. *et al.*, 2009)).

Os elementos e os núcleos da plataforma são apresentados em suas funcionalidades por (GIL, F. DE O. *et al.*, 2009) (GIL, F.; ALDECÔA, 2010), com as características que seguem:

- O Núcleo Gerenciador do Ambiente de Simulação é responsável pela execução dos ensaios relacionados à configuração, dinâmica de testes e coleta de dados que são realizados na plataforma.
- O Controlador de Tráfego Aéreo é representado por $ATCo_j$ e o Agente Aeronave VANT por A_i , ambos inseridos no Servidor de Representação do Espaço Aéreo.
- Os agentes aeronave $A_{i..n}$ representam o comportamento e interação das aeronaves no espaço aéreo, possuindo um modelo de dinâmica das aeronaves, sistema de navegação e as condições meteorológicas locais. Em A_i está a *interface* que insere o conceito de HIL (*Hardware In the Loop*) à plataforma, por meio de equipamentos físicos para aquisição de dados.
- A integração da plataforma se dá por meio de troca de mensagens que representam os estados de um módulo quanto às ações que são requisitadas para o referido módulo.
- E_i representa um estado que recebe informações de A_i e as envia para o Servidor de Representação do Espaço Aéreo, o qual reenvia as mensagens de estado do servidor aos órgãos ATC (*Air Traffic Control*) e aeronaves próximas, por meio do estado S_i , sendo este uma composição de informações fornecidas pelo estado E_i . O estado E_i é composto por informações de Identificação da Aeronave (Tipo e Número), variáveis de Posição (latitude, longitude e altitude), Velocidade e Plano de Voo atual.
- O ATCo (*Air Traffic Controller*), utilizando informações de S_i , realiza as ações de controle, enviando estas informações ao Núcleo Gerenciador do Ambiente de Simulação, por meio do estado F_i , o qual consolida e replica estas informações aos agentes necessários.

A Figura 23 ilustra uma visão dos elementos da plataforma e com quais módulos estão relacionados. Pode ser vista a associação dos módulos aos elementos, bem como as interações dos elementos pertencentes aos módulos fazendo com que seja realizada a comunicação da plataforma como um todo.

Figura 23 – Representação dos Módulos Aplicados aos Elementos da Plataforma PipE-SEC.

O ambiente utilizado para simulação é representativo em relação ao ambiente real para validar a proposta desta Tese. Uma possível restrição para uma representação mais próxima ao ambiente real consiste no uso de um maior número de roteadores utilizados para envio das mensagens.

5.1. Comparação com Outros Ambientes de Simulação

Há outros ambientes de simulação que permitem utilizar a técnica de injeção de falhas para que se possa observar um determinado comportamento. Para esta Tese foram estudados dois outros ambientes para que fosse possível analisar as características apresentadas por cada um destes ambientes. A Tabela 2 apresenta um comparativo de características necessárias para o ambiente de simulação.

Tabela 2- Comparativo Entre Ambientes para Injeção de Falhas.

	Ambiente Aeronáutico Nativo	Operações Críticas de Risco	Ambiente Distribuído	Protocolo CPDLC Integrado	Operações em Tempo Real
INFIMO			X		X
OPNET Modeler Suite			X		
PIpE-SEC	X	X	X	X	X

O ambiente INFIMO (*INtrusive less Fault Injector MOdule*) é um *toolkit* para realização de experimentos de injeção de falhas para validação da dependabilidade de protocolos com restrições temporais, ou seja, considerando o tempo de execução do protocolo. No entanto esse ambiente possui como característica desprezar a latência na comunicação (BARCELOS, 2001). Como apresentado na Tabela 2, esse ambiente não atinge o conjunto de elementos necessários para que possa ser utilizado em uma simulação para o ambiente aeronáutico e não possui suporte ao protocolo CPDLC.

O ambiente OPNET Modeler Suite é comumente utilizado para simulação de redes de computadores, visando realizar simulações cujo foco seja relacionado à topologia da rede. Nessas simulações podem ser implementados os serviços necessários para a comunicação e também a injeção de falhas. No entanto, esse ambiente também não possui a gama de elementos necessários para que seja simulado o ambiente aeronáutico e não possui suporte ao uso do protocolo CPDLC (MENDES, 2003).

A Plataforma PIpE-SEC (Plataforma Integrada para Ensaio de Sistemas Embarcados Críticos) é um ambiente desenvolvido especificamente para simulações que necessitem de características do ambiente aeronáutico. Possui o protocolo

CPDLC integrado ao ambiente e os elementos que são exigidos para que possam ser validadas as simulações realizadas comunicação aeronáutica, como dispostos na Tabela 2.

Com base nesse contexto analítico, optou-se pelo uso da plataforma de ensaios PIP-E-SEC como ambiente para realização das simulações desta Tese.

5.2. Considerações Finais deste Capítulo

O uso de ambientes simulados para a análise de novos conceitos e propostas baseadas em tecnologias em uso ou em estudo visa garantir uma observação prévia do ambiente próximo à realidade, proporcionando economia de recursos.

Neste âmbito, este Capítulo apresentou o ambiente PIP-E-SEC, bem como fez uma comparação com outros dois ambientes de simulação, mostrando as vantagens do PIP-E-SEC, e assim justificando sua utilização.

No próximo Capítulo é apresentada a proposta para avaliar as interferências na comunicação aeronáutica por meio do protocolo CPDLC, a qual faz uso do ambiente apresentado neste Capítulo.

6. PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DAS INTERFERÊNCIAS NA COMUNICAÇÃO AERONÁUTICA

Para compor o ambiente simulado foram definidos três parâmetros que são utilizados durante o processo de simulação, o parâmetro de tempo Δt , o parâmetro relativo à alteração a ser feita na mensagem, MSG e o parâmetro MSG+ Δt que é a composição de ambos. Os parâmetros são explicados mais detalhadamente na sessão 6.1.3.

A alteração desses parâmetros no ambiente propicia a análise de informações relativas ao comportamento da comunicação, mediante as falhas inseridas no ambiente simulado. A Figura 24 ilustra como os parâmetros definidos são aplicados no ambiente simulado para a obtenção dos resultados de análise.

Figura 24 – Parâmetros Utilizados para Análise.

Ainda, na Figura 24, é ilustrada a questão da separação mínima entre as aeronaves. Nesta proposta, a condição para que seja mantida a separação mínima está relacionada ao envio e recebimento das mensagens não corrompidas, ou seja, uma das condições para a manutenção da separação mínima é garantida por meio da integridade na troca de mensagens. Desta forma, a separação mínima entre as aeronaves não é diretamente considerada para a simulação.

6.1. Ambiente Aeronáutico onde se Insere o Módulo de Falha ATN

Nos Capítulos anteriores foram abordados tópicos que descrevem componentes relacionados ao ambiente aeronáutico e sua ligação com os sistemas que compõem o controle do espaço aéreo, os quais se caracterizam por enviar ou receber informações durante a trajetória de voo, sendo estas informações automáticas ou por solicitação.

Nesta sequência, é necessário descrever como se dá o inter-relacionamento entre os conceitos e especificações técnicas do ambiente aeronáutico, tendo em vista a necessidade de integração do módulo de injeção de falhas ao ambiente, de forma a atender seus objetivos.

A Figura 25 ilustra os elementos utilizados nesta Tese, que compõem o ambiente aeronáutico necessário para a validação da proposta, de forma a apresentar a relação entre os mesmos. O Sistema ATM Global é a base e seu objetivo é fornecer os conceitos inerentes às definições que o ambiente de simulação necessita para prover os serviços no ambiente aeronáutico, como por exemplo, as especificações de implementações que as aplicações devem seguir para serem utilizadas no ambiente aeronáutico, o inter-relacionamento dos elementos que possibilita a implementação das funcionalidades do ambiente.

Os componentes internos da figura são: o Ambiente ATN, o Ambiente de Simulação e o Módulo de Falha ATN. O Ambiente ATN tem a capacidade de prover um ambiente normatizado, sendo este interligado com o Ambiente de Simulação o qual possui como base de construção características definidas na ATN.

Finalmente, tem-se a ligação entre o Ambiente de Simulação e o Módulo de Falha ATN, sendo que a plataforma fornece ao módulo as características de um ambiente aeronáutico para que este seja integrado à mesma. Assim, o inter-relacionamento entre cada uma das partes é importante para que se possa entender a necessidade de integração e atuação entre os conceitos que definem o ambiente aeronáutico e o ambiente simulado.

Figura 25 – Visão Ampla da Relação do Módulo de Falha ATN no Ambiente Aeronáutico.

Na sequência, a Figura 26 ilustra o cenário que representa a comunicação, utilizando os elementos do ambiente aeronáutico, e também a localização onde o módulo para injeção de falhas deve atuar na injeção de falhas na comunicação. São elementos que fazem com que o inter-relacionamento apresentado na Figura 21 seja possível de ser implantado.

Figura 26 – Cenário Referente ao Ambiente de Comunicação Simulado.

Nesse cenário, estão representados os elementos pertencentes ao ambiente que compõe a comunicação sobre a ATN, sendo o ATCo parte representativa da comunicação em terra junto às aeronaves. As transmissões dos dados relativas ao mecanismo de comunicação CPDLC são enviadas e recebidas sobre o protocolo IPv6 em uma comunicação bidirecional, processadas e encaminhadas por um servidor/roteador.

É importante elucidar que o Módulo de Falha ATN opera diretamente na troca de mensagens por meio de comunicação estabelecida entre uma aeronave controlada e o ATCo (*Air Traffic Controller*) ao qual estiver sob jurisdição, conforme descrito na seção 3.2.

Nota-se na Figura 26, que a atuação do Módulo de Falha ATN ocorre após a autenticação do ATCo para envio e recebimento das mensagens. A importância de o módulo ser utilizado nesta posição está no fato de que não haja negação de serviço no momento em que as mensagens são capturadas para serem processadas e então reenviadas para a aeronave.

A comunicação CPDLC se enquadra na camada 5 do Modelo TCP/IP, conforme descrito no Capítulo 4. Desta forma, tanto o módulo CPDLC, quanto o Módulo de Falha ATN estão inseridos na camada 5 do Modelo TCP/IP.

6.1.1. Elementos Considerados no Ambiente ATN

A ATN possui características que proporcionam o uso de diversas aplicações em sua estrutura (PRABHU; THOMSON, 2007), (FEIGHERY *et al.*, 2002) e (GAO *et al.*, 2008). Desta forma, para esta Tese são considerados os seguintes elementos da rede:

1. Tamanho dos pacotes de dados que são transmitidos.
2. Protocolo utilizado.
3. Tempo de transmissão.
4. Servidor para interpretação das mensagens encaminhadas.

6.1.2. Parâmetros Considerados no Módulo de Falha ATN

A definição do tipo de falhas produzidas pelo módulo de injeção de falhas é necessária para classificar as condições sob as quais as mesmas devem ser geradas, durante a simulação, uma vez que são injetadas em diferentes momentos durante o tempo de simulação.

Outra colaboração desta Tese consiste em se definir quais são as falhas utilizadas nas simulações. Esta definição foi feita considerando quais são as falhas que mais colocam a comunicação entre os VANT e controles em terra (ATCo) em situações de risco.

Na Tabela 3, é apresentada a classificação das falhas definidas e injetadas pelo Módulo de Falha ATN. Esta classificação representa a relação da falha em relação à localização de ocorrência no cenário.

Tabela 3- Classificação das Falhas a serem Injetadas.

Tipo de Falha	Descrição da Falha
Colapso	Componente para de funcionar ou não responde.
Comportamento	Ocorre a corrupção dos dados, de forma inconsciente ou por comportamento malicioso.
Rede	A mensagem é perdida na rede quando enviada e antes de ser recebida.

A escolha dos três tipos de falhas que o módulo utiliza, é relevante na simulação realizada, visando avaliar a integridade das mensagens trocadas entre o VANT e o ATCo.

Analisar a interferência causada por uma falha de colapso traz resultados diretamente relacionados ao ambiente onde as aplicações de controle estão inseridas. No caso das falhas definidas para a simulação não houve a necessidade de realizar uma análise com o auxílio da técnica de FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), pois tal tipo de análise apresentaria resultados bastante repetitivos, não trazendo, portanto, contribuição significativa.

A falha relacionada ao comportamento tem foco na análise das interferências causadas por conteúdo incorreto das mensagens, ou seja, as mensagens que possuem seu conteúdo alterado.

Considerando que toda a comunicação é provida por meio de um ambiente de rede de computadores, é necessário avaliar as possíveis interferências causadas pela condição de não recebimento de uma mensagem.

Esta análise é importante em situações, nas quais o serviço oferecido por uma aplicação não necessite de confirmação de recebimento da mensagem, podendo afetar o sistema como um todo. Como exemplo pode-se citar as informações meteorológicas que não necessitam de confirmação de entrega, mas que são fundamentais e podem interferir diretamente na segurança de voo.

Outra característica importante engloba todas as falhas, refere-se aos tempos máximos estimados na entrega das mensagens. Uma falha na comunicação fica caracterizada quando ocorre o não cumprimento desses tempos. Considerá-los é fator necessário para garantir que os resultados da simulação sejam íntegros.

Na normatização, a ICAO define os tempos máximos desejados para a transmissão dos dados, sendo esta definição apresentada por meio das classes *ATSC (Air Traffic Service Communications)*. Essas classes servem de parâmetros para especificar a qualidade esperada de serviços para a transferência dos dados em relação à localização da aeronave no espaço aéreo, sendo utilizadas por todos os serviços de comunicação que envolvem o ambiente aeronáutico. Por meio desta classificação, que define a localização da aeronave no espaço aéreo, são determinados os tempos máximos aceitáveis para a transmissão dos dados.

Caso haja mais de um roteador no ambiente para troca de mensagens, o roteamento dessas mensagens pode ser administrado para que os tempos possam ser diminuídos em relação ao roteamento comum. No caso da simulação feita nesta Tese há apenas um roteador, não necessitando, portanto dessa otimização.

A Tabela 4 demonstra os valores de tempo limite, aceitáveis para a entrega de mensagens a uma determinada aeronave, em relação ao nível de voo (altitude) em que se encontra.

Tabela 4- Classificação de Atrasos Permitidos. (Fonte: (ICAO, 1999b))

Classe ATSC	Nível de Voo Permitido (em pés)	Valor Máximo de Atraso Permitido. (segundos)
A	Espaço reservado. Entre nível médio do mar e 18000 pés	Reservado
B	Espaço entre nível médio do mar e 10000 pés	4.5
C	Espaço entre nível médio do mar e 4000 pés	7.2
D	Espaço entre nível médio do mar e 2500 pés	13.5
E	Espaço entre nível médio do mar e 700 ou 1200 pés	18.0
F	Não assessorada por controladores; pode ser abaixo ou acima do FL 100	27.0
G	Espaço aéreo não controlado	50.0
H	Não especificada	100.0
Sem preferência		Sem valor especificado

Cada tempo especificado considera a posição em que a aeronave se encontra no momento da transmissão. Para obtenção dos resultados na simulação proposta é considerado o tempo relacionado à Classe B, que se refere à comunicação em áreas terminais.

A escolha da Classe B dá-se pelo fato de que é a classe que possui o maior número de ocorrências de falhas de comunicação, segundo (DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO, 2013).

A ICAO, utilizando esta classificação, determina que o valor máximo aceitável de mensagens não entregues, englobando todos os dados que trafegarem na ATN, de modo fim-a-fim, seja menor que 5%, (ICAO, 2010).

Assim, a definição do tempo de envio de uma mensagem entre o ATCo e uma aeronave é definida por Δt_{total} . Esse tempo é composto pelos tempos de envio e de confirmação de recebimento pela aeronave, conforme a expressão a seguir:

$$\Delta t_{\text{total}} = \Delta t_{\text{envio}} + \Delta t_{\text{confirmação}}$$

Neste ponto deseja-se avaliar o tempo máximo utilizado para transmissão da mensagem via CPDLC entre o ATCo e a aeronave. No entanto, quando o tempo de envio da mensagem estiver relacionado a fatores que podem levar à ocorrência de falhas na rede, pode-se ter:

$$\Delta t_{\text{total}} > \Delta t_{\text{máximo}}$$

6.1.3. Método de Simulação Aplicado ao Módulo de Falha ATN

Dado o cenário de probabilidade da ocorrência de determinada interferência na comunicação, foram definidos três parâmetros para esta Tese que representam as possíveis probabilidades. A definição dos parâmetros foi feita por análise de quais são os problemas mais recorrentes para que as mensagens não cheguem até as aeronaves ou ainda que essas aeronaves não consigam interpretá-las corretamente.

Os parâmetros utilizados na manipulação dos dados são relacionados com as falhas apresentadas na Tabela 3. Os parâmetros são:

- I. MSG
- II. Δt
- III. MSG + Δt

O primeiro parâmetro definido como MSG indica que deve ser feita a alteração de uma das mensagens padrão utilizadas na comunicação. Tais alterações são realizadas de duas formas: a primeira por alteração de conteúdo da mensagem, isto é, por inserção de dados não padronizados para as mensagens e a segunda por alteração binária da mensagem, sendo alterado o primeiro *bit* da mensagem a ser enviada.

O segundo parâmetro definido como Δt refere-se ao tempo de envio da mensagem. Esse parâmetro refere-se ao tempo máximo (em segundos) determinado para a troca de mensagens. Nesse parâmetro, o tempo de troca da mensagem é alterado para que seja superior ou inferior ao tempo limite definido.

O terceiro parâmetro, definido como $MSG + \Delta t$, refere-se à composição alteração da mensagem e de seu tempo de envio.

Para realizar a aplicação das simulações, foram definidas 3 faixas que consideram os tipo de falhas a serem injetadas, relacionadas a cada um dos parâmetros acima descritos, sendo:

- I. Probabilidade de 40% para a ocorrência de falhas relativas ao parâmetro MSG.
- II. Probabilidade de 30% para a ocorrência de falhas relativas ao parâmetro Δt .
- III. Probabilidade de 30% para a ocorrência de falhas relativas a ambos os parâmetros $MSG + \Delta t$.

Essas probabilidades foram utilizadas tendo como base, estatísticas feitas pela INFRAERO (INFRAERO, 2013).

Para a aplicação das simulações, foram selecionadas cinco categorias de mensagens e em cada categoria foram selecionadas determinadas mensagens a serem enviadas, conforme apresentado na Tabela 5.

O Protocolo CPDLC possui uma gama de 240 mensagens padronizadas e divididas em 12 categorias. Foram analisadas todas as categorias e suas mensagens, sendo definida as 4 categorias e as 8 mensagens apresentadas na Tabela 5 como as possíveis mensagens com maior impacto na comunicação de aeronaves VANT. O apêndice A apresenta a descrição dos tipos de mensagens utilizados no ambiente de simulação.

Tabela 5- Classificação das Mensagens.

CATEGORIA	TIPO DE MENSAGEM
CLIMB	CLIMB TO [LEVEL] MAINTAIN [LEVEL]
ROUTE	PROCEED BACK ON ROUTE
DESCEND	MAINTAIN [LEVEL] DESCEND TO AND MAINTAIN LEVEL] DESCEND TO [LEVEL]
EMERG	IMMEDIATELY CLIMB TO [LEVEL] IMMEDIATELY DESCEND TO [LEVEL]

As categorias e respectivas mensagens foram definidas considerando as operações que possam gerar impacto imediato em voo. Outra consideração é que para operações com aeronaves não tripuladas, as mensagens devem possuir resposta automática, ou seja, não deve ser utilizado o MCDU⁶ (*Multipurpose Control Display Unit*).

A definição sobre qual a categoria deve ser utilizada para a manipulação no ambiente simulado é variável, ou seja, a escolha deve se basear em decorrência da simulação que se deseja realizar.

6.2. Características do Módulo de Falha ATN

A injeção de falhas foi atingida por meio da inclusão de um módulo de injeção de falhas no ambiente de simulação, já descrito no Capítulo 4. Esse módulo recebeu a denominação de Módulo de Falha ATN.

⁶ MCDU é o equipamento alfanumérico com display que interage com os sistemas da aeronave, que é utilizado pelo piloto para responder, de forma manual, às requisições solicitadas pela torre de controle. Este equipamento visa atender os serviços de comunicação digital oferecidos por meio do conceito CNS/ATM (GROUP, 1990).

O módulo é integrado à plataforma de auxílio ao ambiente de simulação para que possa utilizar informações e características já dispostas na plataforma PipE-SEC. A Figura 27 ilustra a estrutura da plataforma com a inclusão do módulo de injeção de falhas desenvolvido para auxílio na validação da proposta deste trabalho.

Figura 27 – Conexão do Módulo de Falha ATN à Plataforma PipE-SEC. (Fonte: (ROSSI *et al.*, 2012)).

Nessa estrutura, com a inclusão do Módulo de falha ATN, são utilizadas as mensagens que transitam entre os demais módulos para que possam ser injetadas as falhas no ambiente de comunicação.

Desta forma, a relação entre os módulos para troca de mensagens define as possíveis integrações que entre eles e como os dados transmitidos durante uma comunicação podem trafegar entre esses módulos.

As informações são transmitidas seguindo a necessidade de comunicação a ser utilizada nos ensaios realizados com a plataforma. Por se tratar de módulos que fornecem diferentes informações para a integração do ambiente da plataforma, os

ensaios realizados podem utilizar essas informações transmitidas entre os módulos de forma separada ou conjunta.

O uso de forma separada consiste na possibilidade de realizar ensaios utilizando o módulo que atenda somente a uma necessidade específica e que não necessariamente precise trocar informações entre os outros módulos. Por exemplo, um ensaio que faça somente a leitura de dados de voo, utilizando um simulador, pode ser realizado diretamente com o módulo específico sem a necessidade de outros módulos.

Para a validação da proposta desta Tese, o Módulo de Falha ATN utiliza diretamente a comunicação via CPDLC com a aeronave que é representada pelo Módulo Virtual UAV, tendo o módulo da plataforma PipE-SEC como base de comunicação.

6.3. Premissas e Parâmetros Considerados para Uso do Módulo de Falha ATN

Para o sucesso na análise e obtenção das medidas utilizando o Módulo de Falha ATN é necessário que condições mínimas relacionadas à eficiência do uso do módulo no ambiente aeronáutico sejam garantidas, bem como, a capacidade de reportar os resultados dos testes realizados.

Desta forma, são estabelecidas, para o ambiente onde são realizadas as simulações, as seguintes premissas:

- i. O ambiente prevê que o espaço aéreo modelado esteja com sua capacidade de alocação de aeronaves dentro dos limites máximos estabelecidos pelos órgãos regulamentadores.
- ii. Prevê-se que as aeronaves expostas às condições exigidas para a comunicação tenham como manter o ATCo ciente de sua posição. A mesma exigência deve ser atendida quanto à disponibilidade do mecanismo de comunicação CPDLC entre as aeronaves e o ATCo.
- iii. A comunicação entre o ATCo e as aeronaves deve ter ativo o link de dados

durante todos os ensaios.

Uma vez definidas as premissas iniciais que deverão ser atendidas pelo modelo proposto, podem ser definidos, preliminarmente, os parâmetros que deverão ser analisados para apresentação dos possíveis resultados, conforme exposto a seguir:

- i. Utilização do protocolo IPv6 para o ambiente de transmissão dos dados: desta forma é verificado o comportamento deste protocolo quanto à capacidade de suportar o tráfego simulado em diferentes momentos da comunicação.
- ii. Em relação aos parâmetros a serem analisados para as falhas, considera-se que, definidas as variáveis de entrada para cada falha, deve-se definir e analisar as variáveis de saída para cada uma, de forma a consolidar a amostra manipulada.

6.4. Ambiente de Simulação para Análise de Interferências

Neste tópico são apresentados os elementos que compõem esta instrumentalização. São apresentadas as estruturas e como são utilizadas na composição do ambiente simulado. A Figura 28 ilustra a estrutura que representa a instrumentalização do ambiente de simulação.

Os módulos CPDLC YSSY que representa o controle em terra (ATCo) e o ACARS Server que representa a aeronave tiveram como base um código open source desenvolvido pelo Centro de Controle de Tráfego Aéreo Australiano.

Figura 28 – Visão Estrutura do Ambiente de Simulação

Para validação da proposta apresentada foi instrumentalizado um ambiente de simulação composto pela aplicação que realiza a comunicação entre a aeronave e o órgão de controle em terra, sendo que o módulo de injeção de falhas tem a possibilidade de injetar as falhas com propósito de avaliar as interferências geradas.

6.4.1. Estrutura do Módulo para Injeção de Falhas (Módulo de Falha ATN)

O Módulo de Falha ATN foi construído utilizando a linguagem de programação gráfica por meio do *software* Labview 2012. O Labview é um ambiente de desenvolvimento com grande integração de *software* e *hardware* que proporciona diversas possibilidades de desenvolver sistemas de medição e controle.

A estrutura do módulo é composta por três partes fundamentais, sendo:

- Captura da mensagem. Nesta fase a mensagem enviada pelo ATCo para a aeronave é capturada para que seja realizada a alteração do conteúdo.
- Alteração do conteúdo. Após a captura da mensagem, o conteúdo é alterado e reenviado.
- Processo de conexão do módulo com o servidor sem que seja perceptível a captura inicial da mensagem. Nesta fase o módulo envia a mensagem, utilizando a conexão já estabelecida pelo ATCo para o servidor que a direciona à aeronave. Nesta fase também pode ser definido o tempo

desejado para que a mensagem possa ser encaminhada.

A Figura 29 ilustra a estrutura do Módulo de Falha ATN. Nota-se, na Figura, a delimitação, por meio das linhas tracejadas, que define a execução em cada parte do módulo.

Figura 29 – Estrutura do Módulo de Falha ATN.

Ao iniciar aplicação de envio de mensagens CPDLC é necessária a conexão com o servidor para que seja realizada a troca de mensagens. No entanto, para que seja possível, em primeiro lugar, capturar a mensagem enviada, para em seguida realizar a alteração e então enviar a mensagem à aeronave, faz-se necessário que, entre esses passos, seja utilizado o Módulo de Falha ATN.

Dessa forma, a autenticação do ATCo que possui a permissão para envio e recebimento de mensagens é realizado em uma *interface* que simula ser o ACARS Server, sendo então autorizado o envio de mensagens. Essas mensagens são recebidas no Módulo de Falha ATN onde são modificadas e enviadas para que sejam recebidas pela aeronave.

Após a alteração da mensagem é necessário que essa seja enviada ao servidor, e para que isso ocorra, foi desenvolvida a *interface* que simula ser o ATCo. Com isso, a mensagem enviada por meio do Módulo de Falha ATN é recebida pela *interface*

que a direciona ao servidor.

Ao receber a mensagem alterada, o servidor a encaminha à aeronave. Sem conseguir identificar que a mensagem recebida não foi enviada diretamente pelo ATCo, há o retorno de uma confirmação de recebimento.

A Figura 30 ilustra como a mensagem é enviada pelo ATCo (Módulo CPDLC), é capturada pelo Módulo de Falha ATN onde é realizada a alteração e reenviada para o servidor para entrega à aeronave. As duas interfaces servem para simular a autenticação correta entre os módulos CPDLC YSSY e ACARS Server.

Figura 30 – Apresentação do Trajeto da Mensagem Início-fim.

O ambiente simulado deve entender que o fluxo de envio e recebimento das mensagens é contínuo, ou seja, não deve ser identificado que houve o desvio das mensagens entre o CPDLC YSSY e o ACARS Server. Por isso a captura das mensagens pelo módulo somente é realizada após a autenticação do ATCo autorizado.

As mensagens de respostas não sofrem alterações por interferência do Módulo de Falha ATN, pois retornam diretamente ao módulo CPDLC somente após a possível

interpretação da mensagem enviada. Ou seja, o Módulo de Falha ATN atua somente realizando as interferências nas mensagens enviadas para que sejam interpretadas pela aeronave VANT, e assim as mensagens de respostas são preservadas.

6.4.2. Aplicação Utilizada para Envio de Mensagens CPDLC

A Figura 31 apresenta uma visão em camadas da aplicação.

Figura 31 – Visão em Camadas da Aplicação CPDLC.

Na Figura 31, a camada de serviços CPDLC representa os elementos utilizados pela aplicação para comunicação entre os módulos. A camada *Dialog Service* é utilizada para estabelecer comunicação de aplicações que utilizam o Ambiente ATN.

A camada Servidor de Comunicação ATN representa a implementação da ATN para o roteamento dos dados, por meio do qual as mensagens são encaminhadas para a aeronave selecionada na comunicação.

O Algoritmo Verificador realiza a confirmação se as mensagens estão sendo enviadas e recebidas corretamente pelos módulos. O algoritmo encontra-se no ANEXO 1.

As Figuras 32 e 33 ilustram as telas iniciais da aplicação após o estabelecimento da comunicação para início do envio das mensagens. No Apêndice A é apresentado o vocabulário e as mensagens utilizadas nesta aplicação.

Na Figura 32 pode-se observar a informação de que o servidor está operando e aguardando o estabelecimento de conexão com o ATCo (Módulo CPDLC YSSY). Na Figura 33 pode-se observar, pelo retângulo na cor verde, na parte de baixo da janela, que a conexão acima citada foi estabelecida, bem como a quantidade de mensagens, categorias e vocabulários disponíveis para a troca de mensagens.

As Figuras 34 e 35 ilustram a relação de aeronaves disponíveis para comunicação e a relação das mensagens CPDLC, respectivamente. O vocabulário refere-se aos valores que são editáveis na composição das mensagens a serem enviadas, que pode ser observado na Figura 35.

Figura 32 – Tela Inicial do ACARS Server.

Figura 33 – Tela Inicial do CPDLC YSSY.

Para envio de uma mensagem é selecionada a aeronave a qual se deseja comunicar (Figura 34) e em seguida o tipo de mensagem a ser enviada à aeronave. As mensagens são padronizadas seguindo a determinação da ICAO por meio do documento DOC4444, no qual é definida a estrutura e o conteúdo padronizado da

mensagem a ser utilizada pela comunicação por meio do protocolo CPDLC (ICAO, 2001).

Figura 34 – Relação das Aeronaves.

Figura 35 – Tela para Composição da Estrutura das Mensagens CPDLC.

A janela apresentada na Figura 35 aparece ao se selecionar a aeronave a qual se deseja enviar uma mensagem. No lado esquerdo são apresentadas as categorias de mensagens que podem ser enviadas e no lado direito são apresentadas as mensagens no momento que se seleciona a classe de mensagens, então podendo

ser selecionada a mensagem que deve ser composta.

Na parte inferior são dispostos os campos que ao selecionar o tipo de mensagem a ser enviada são preenchidos automaticamente com frases padronizadas. Estes campos possuem partes editáveis para atender a composição da mensagem, como no exemplo da Figura o nível de voo pode ser alterado.

Esses campos podem ser utilizados para enviar até cinco mensagens ao mesmo tempo a uma mesma aeronave ou serem utilizados em conjunto para composição de uma mensagem mais complexa. O uso em conjunto desses elementos pode ser exemplificado, como abaixo:

ELEMENT 1: CLIMB TO FL240

ELEMENT 2: THEN

ELEMENT 3: MAINTAIN FL240

Adicionalmente, para verificar o correto funcionamento da aplicação foi desenvolvido o Algoritmo Verificador que captura as informações da comunicação realizada entre o ATCo e as aeronaves. Nesta captura são trazidas informações sobre as mensagens que estão sendo enviadas e recebidas durante a comunicação.

O algoritmo foi desenvolvido para ser executado em *background* durante o período em que a aplicação estiver sendo utilizada. A execução do algoritmo não interfere no desempenho da aplicação e nas mensagens que são transmitidas durante o uso da aplicação. Esse algoritmo captura os dados por meio de leitura da porta (*socket*) que é utilizada pela aplicação e armazena estes dados em um arquivo de texto.

O número indicando 49000, apresentado na Figura 36 (Server TCP Port e ACARS Server), refere-se à porta TCP que a aplicação utiliza para comunicação.

Figura 36 – Telas de Configuração das Portas TCP.

A Figura 37 ilustra o arquivo contendo as informações das mensagens que foram enviadas e recebidas e capturadas pelo Algoritmo Verificador durante um período de captura das informações das mensagens.

```
@DATA
'DL', 'YSSY', 'cpdlc', 0, , 'AN', 'REQUEST LOGON'
'UL', 'YSSY', 'cpdlc', 42, , 'NE', 'STANDBY'
'UL', 'YSSY', 'cpdlc', 45, , 'WU', 'CLIMB TO @FL260'
'DL', 'YSSY', 'cpdlc', 1, 45, 'N', 'UNABLE'
'UL', 'YSSY', 'cpdlc', 46, , 'WU', 'CLEARED TO @LEFT@ VIA @VCP'
'DL', 'YSSY', 'cpdlc', 2, 46, 'N', 'WILCO'
```

Figura 37 – Arquivo de Texto com as Informações das Mensagens Enviadas/Recebida pela Aplicação.

O primeiro campo refere-se ao *link* utilizado (*Uplink* - *UL* ou *Downlink* - *DL*); no campo seguinte é identificado o usuário responsável pelo envio das mensagens, seguido de qual o tipo da mensagem utilizada. Os dois campos numéricos referem-se à posição em fila de envio ou recebimento da mensagem. O penúltimo campo refere-se ao requisito de resposta (AN – mensagem identificada, NE – aguardando ocorrência de evento, WU – aguardando instruções e N – negada), e o último campo representa o conteúdo da mensagem que foi enviada ou recebida.

Nessa Figura são demonstradas as mensagens enviadas corretamente, isto é, sem as alterações realizadas por meio do Módulo de Falha ATN. As mensagens de *Uplink* ou *Downlink* são transmitidas respeitando o padrão definido para o protocolo.

Como padrão para troca de mensagens o protocolo CPDLC estabelece que todas as mensagens devem ser padronizadas, as palavras devem ser escritas em letra maiúscula, além do que os campos editáveis devem utilizar somente o conteúdo pré-definido que é disponível em uma lista.

Com o uso do Módulo de Falha ATN, as mensagens capturadas após o envio passam por alterações em seu conteúdo, que, consequentemente modifica o padrão que é definido no protocolo para o correto reconhecimento das mensagens. As modificações ocorrem somente no conteúdo transmitido pela mensagem, assim são mantidas inalteradas as informações referentes à identificação do pacote de dados durante toda a comunicação.

Assim, uma das alterações para gerar a falha tem como objetivo corromper o pacote de dados por meio da alteração no conteúdo da mensagem, ou seja, conservar as informações de identificação do pacote de dados e realizar as alterações somente no conteúdo de dados das mensagens.

Essa alteração consiste em modificar a primeira letra da frase que se encontra escrita em maiúscula para a escrita usando letra minúscula. Essa forma de alterar a mensagem modifica o padrão exigido pela ICAO, sendo suficiente para causar possíveis perdas de reconhecimento da mensagem.

Por exemplo, a frase correta para a transmissão do conteúdo da mensagem, considerando o padrão exigido é:

CLIMB TO FL240

Após a alteração do conteúdo a frase passa a ser escrita como:

cLIMB TO FL240

Realizando a alteração da primeira letra, consequentemente é alterada a representação binária. A letra “C” tem a representação binária 01000011 que após a alteração para “c” passa a ser representado por 01100011.

Outra alteração refere-se ao nível de voo. Nesta alteração é utilizado um nível de voo não autorizado, ou seja, não está pré-definido para que seja utilizado no envio

da mensagem. Neste caso é preservada a escrita da frase usando letras maiúsculas. Como por exemplo, a frase contendo o nível de voo correto é:

MAINTAIN FL 240

Após a alteração do conteúdo relativo ao nível de voo, a frase passa a ser escrita como:

MAINTAIN FL 241

Neste caso, a mensagem passa a ter o conteúdo do voo não autorizado para a transmissão.

Considerando a Tabela 3 apresentada na seção 6.1.2, ambos os casos de alterações no conteúdo da mensagem estão relacionados à falha definida como falhas de Comportamento e ao parâmetro MSG.

O envio e confirmação de recebimento da mensagem também são considerados e devem atender o tempo máximo de operação, como apresentado na Tabela 3. A alteração do tempo (em segundos) na simulação para entrega e confirmação de recebimento da mensagem, por meio do Módulo de Falha ATN, também é analisado. Essa alteração está relacionada à falha definida como Rede e ao parâmetro Δt .

O parâmetro $MSG + \Delta t$, por ser um parâmetro composto, está relacionado às falhas Comportamento e Rede. Ao selecionar este parâmetro, necessariamente, as duas alterações devem ser realizadas para que a análise possa ser considerada correta.

Por fim, durante a operação de envio e recebimento das mensagens é considerada a falha definida como Colapso, decorrente de interrupção de serviço de rede. Nesse caso não há um parâmetro relacionado a esta falha para que possa ser alterado no ambiente simulado, pois a falha considera que parte do ambiente esteja inoperante durante a simulação. Nesse caso, por exemplo, pode ser interrompido o serviço do ATCo.

6.5. Considerações Finais deste Capítulo

Este Capítulo apresentou os elementos contidos no ambiente simulado para realização da análise de interferências causadas na comunicação via protocolo CPDLC. Também foram explanados as premissas e parâmetros considerados para o Módulo de Falha ATN. Descreve-se ainda como este módulo é utilizado para que seja obtida a análise desejada.

No próximo Capítulo são apresentados os resultados e discussões sobre as simulações realizadas com o ambiente descrito.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo descrevem-se os principais resultados decorrentes das simulações realizadas no ambiente descrito nos Capítulos 5 e 6. Foram feitas 100 simulações para cada uma das mensagens apresentadas na Tabela 4, que apresenta um total de 4 tipos de categorias, resultando em um total de 8 tipos de mensagens. Das 100 simulações citadas, 40 referem-se a falhas do parâmetro MSG, 30 a falhas no tempo de entrega das mensagens (Δt) e 30 referentes à composição dos dois tipos de falhas acima descritos, bem como detalhado na seção 6.1.3.

Foram também considerados os casos de simulação contínua e simulação com intervalos. Por simulação contínua entende-se que o intervalo entre o envio das mensagens é determinado exclusivamente pelo Módulo de Falha ATN. Nesse caso, esse intervalo é bastante restrito. Por simulação com intervalos entende-se que os intervalos são determinados manualmente, pois dependem de seleção de parâmetros pelo operador da simulação. Foram feitas ainda simulações considerando a inserção de mais de um erro para um determinado tipo de mensagem.

Outro tipo de simulação considerou a injeção de falhas por colapso, conforme descrito na Tabela 3. Finalmente, foram feitos testes variando-se o tempo para entrega das mensagens, com valores acima dos especificados pela ICAO.

Todas as simulações foram realizadas utilizando o ambiente de transmissão de dados configurado com o protocolo IPv6, utilizando o número IP 2001:db8::130f:0:0:140b e como prefixo do comprimento da sub-rede, o valor 64.

No que se refere à injeção de falhas nas categorias de mensagens (MSG), as mesmas foram alteradas de acordo com a seguinte lista:

- Categoria CLIMB:
 - CLIMB TO FL 240 para cCLIMB TO FL 240
 - MAINTAIN FL 240 para mMAINTAIN FL 240

- ROUTE
 - PROCEED BACK ON ROUTE para pROCEED BACK ON ROUTE
- DESCEND
 - MAINTAIN FL 240 para mAINTAIN FL 240
 - DESCENT TO AND MAINTAIN FL 240 para dDESCENT TO AND MAINTAIN FL 240
 - DESCEND TO FL 240 para dDESCEND TO FL 240
- EMERG
 - IMMEDIATELY CLIMB TO FL 240 para iMMEDIATELY CLIMB TO FL 240
 - IMMEDIATELY DESCEND TO FL 240 para iMMEDIATELY DESCEND TO FL 240

Para todas as categorias de mensagens e no tocante à injeção de falhas no parâmetro Δt foi considerado o tempo de 3 segundos para o envio das mensagens, ou seja, 1,5 segundos abaixo do tempo máximo padronizado, porém não realizando alteração de conteúdo da mensagem. Tais falhas consideraram a simulação contínua, conforme acima detalhado.

Finalmente, para a composição de falhas de todas as categorias, referente aos parâmetros MSG e Δt (MSG + Δt), foram consideradas, de forma conjunta, as duas injeções de falhas acima descritas.

Os Gráficos 1 a 4 ilustram as simulações realizadas para as quatro categorias, cujos modos de injeção de falhas estão acima detalhados.

Gráfico 1: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria CLIMB.

Gráfico 2: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria ROUTE.

Gráfico 3: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria DESCEND.

Gráfico 4: Mensagens com Falhas Interpretadas como Aceitas Relativas à Categoria EMERG.

É importante destacar que nessas simulações, para as situações de alteração de mensagens, os casos em que as mensagens consideradas como falhas são aquelas em que o protocolo não conseguiu distinguir o erro de conteúdo. Nesses casos, o protocolo conseguiu gerar a mensagem de reconhecimento, recebida pelo gerador da mensagem CPDLC, que então será confundido por essa última mensagem.

Nas situações de alteração do tempo (Δt), os casos em que as mensagens são consideradas como falhas são aqueles em que o protocolo não conseguiu gerar a mensagem de reconhecimento, pois o valor de intervalo de tempo escolhido para a simulação (3,0 s) é inferior ao valor padronizado pela ICAO (4,5 s).

Finalmente, nas situações de alteração de conteúdo de mensagem (MSG) e de tempo (Δt), os erros considerados são aqueles em que as mensagens consideradas como falhas são as que o protocolo também não conseguiu distinguir o erro de conteúdo, bem como aquelas em que o protocolo não conseguiu gerar a mensagem de reconhecimento (intervalo de tempo escolhido da simulação é inferior ao valor padronizado pela ICAO).

Os resultados apresentados nos quatro gráficos demonstram que o nível de erros, conforme acima detalhado, no que se refere a falhas injetadas nas mensagens (MSG) ficou próximo de 49,5% nos quatro casos (mensagens enviadas e não interpretadas). Tal característica pode ser explicada pelo fato de que a simulação contínua, conforme aplicado nessas simulações apresenta intervalo entre elas bastante restrito, o que não é totalmente suportado pelo protocolo.

Considerando ainda os gráficos 1, 3 e 4, os valores encontrados para os tipos de mensagens apresentam discrepâncias entre si. Tal fato pode ser explicado pela própria implementação do protocolo de comunicação, que não proporciona o mesmo comportamento para o reconhecimento das mensagens.

Considerando-se a injeção de falhas no tempo (Δt), nota-se que o nível de erro é superior ao caso da injeção de falhas no conteúdo das mensagens (MSG). Tendo em vista que o valor de intervalo de tempo escolhido para a simulação (3,0 s) é inferior ao valor padronizado pela ICAO (4,5 s), seria de se esperar que não houvesse falhas. No entanto, o que se observa é um comportamento bastante

diferente. Tal fato pode ser explicado pelo fato de que a simulação contínua, conforme aplicado nas simulações, apresenta intervalo entre elas bastante restrito, o que não é totalmente suportado pelo protocolo.

Finalmente, no que se refere à composição da injeção de falhas, (MSG + Δt), obteve-se um nível médio de erros em torno de 39%, portanto, inferior ao caso apenas da injeção de falhas no conteúdo das mensagens.

Os resultados ilustrados no Gráfico 5 apresentam um comparativo entre as mensagens enviadas durante a comunicação, considerando duas condições: sem o uso do Módulo de Falha ATN e com o uso desse módulo. Ambas as simulações foram realizadas considerando um intervalo de tempo (Δt) entre o envio das mensagens de aproximadamente 4 segundos, considerando a injeção manual de falhas.

Os resultados apresentaram que ao enviar as mensagens sem erros e com intervalo manual entre as mesmas, todas as mensagens foram corretamente enviadas e recebidas pela aeronave. No entanto, as mensagens que foram enviadas com o mesmo intervalo, mas com o uso da injeção de falha no conteúdo das mensagens, apresentaram os resultados de aproximadamente 43%.

Gráfico 5: Comparativo Utilizando Intervalo para Envio das Mensagens.

Com o objetivo de apresentar um maior número de análises comparativas de mensagens com e sem uso do Módulo de Falha ATN, foi realizada a simulação considerando o mesmo intervalo de tempo para envio das mensagens.

Porém para as mensagens que sofreram a injeção de falha foi considerado a inserção de 2 erros na mensagem, sendo a alteração em outra posição binária e a alteração do nível de voo. Desta forma, a mensagem foi alterada para CLIMB TO FL249 e o tempo de envio foi alterado para 3 segundos. Os resultados são ilustrados no Gráfico 6.

Afere-se que os resultados obtidos com o envio das mensagens sem a injeção de falhas e com intervalo de envio resultou em um percentual de 100% de envio correto, sendo o mesmo resultado apresentado na simulação anterior. Ao utilizar a injeção de falha na mensagem os resultados obtidos voltaram a apresentar percentuais de erros, sendo obtidos valores próximos de 49% de erros.

Uma importante análise refere-se à quantidade de erros que a mensagem pode vir a possuir. Os resultados demonstraram que a quantidade de erros não determina um maior percentual significativo de erros no envio das mensagens, ou seja, o protocolo não interpreta os erros em separado, mas sim a condição de interpretar e responder a mensagem em decorrência do padrão enviado.

Gráfico 6: Comparativo de Mensagens Enviadas com Erro e sem Erro de Conteúdo.

Adicionalmente, foram realizadas mais simulações com objetivo de aferir os resultados relacionados especificamente ao parâmetro Δt . O parâmetro de tempo foi alterado para um valor acima do máximo permitido (4,5 s) para as operações de envio das mensagens à aeronave, porém mantido o valor para resposta a solicitação. O Gráfico 7 ilustra os resultados obtidos.

Gráfico 7: Mensagens Utilizando o Parâmetro Δt com Tempo não Permitido.

Os resultados apresentados no Gráfico 7 demonstram que em nenhum caso o envio de mensagem é aceito quando se utiliza o tempo superior ao definido como padrão. Para aferir este resultado em particular, foram realizadas simulações utilizando o tempo de 7 segundos e também o tempo de 10 segundos, para as mensagens PROCEED BACK ON ROUTE e IMMEDIATELY DESCEND TO FL240, respectivamente. Ambas as simulações confirmaram o mesmo comportamento do protocolo quanto a tempos superiores ao definido em norma.

Ainda, considerando as análises para o parâmetro Δt foram realizadas simulações a fim de aferir qual o tempo mínimo aceitável para que as mensagens pudessem ser enviadas durante a comunicação. Foi aferido que o tempo mínimo aceitável para o envio das mensagens durante a comunicação não deve ser inferior a 2 segundos.

A condição de utilizar os valores muito abaixo do padrão determinado faz com que as mensagens sejam enviadas em uma sequência muito rápida, sendo estes valores inaceitáveis para que as mensagens sejam enviadas à aeronave e que se obtenha uma resposta por interpretação do conteúdo.

A Falha por Colapso não está relacionada a nenhum parâmetro, pois somente ocorre quando parte do sistema de comunicação apresenta-se inoperante. A fim de aferir os resultados advindos da falha, a comunicação com o ATCo foi colocado em estado indisponível durante o processo de envio das mensagens.

Foram enviadas 100 mensagens da categoria ROUTE e após 4 minutos e 26 segundos a comunicação foi interrompida. O Gráfico 8 ilustra os resultados obtidos pela Falha Colapso, sendo enviadas 64 mensagens e 36 não foram enviadas por motivo da falha.

Gráfico 8: Mensagens Enviadas Durante a Falha por Colapso.

Após a interrupção da comunicação do ATCo com a aeronave para envio das mensagens não foi possível reestabelecer a mesma comunicação. Desta forma, as posteriores não puderam ser enviadas. Na análise desta falha, apresentou-se um resultado comum em ocorrências onde há interrupção de serviços.

Relativo às simulações realizadas a fim de aferir o uso do protocolo IPv6 como meio de transmissão de dados no ambiente, foram enviadas mensagens com o ambiente configurado pelo protocolo IPv6 e mensagens enviadas com o ambiente configurado pelo protocolo IPv4.

Os resultados apresentaram que não houve alteração nos resultados em decorrência da configuração do novo protocolo no ambiente de transmissão de dados digitais, isto é, os resultados obtidos com o uso do protocolo IPv4 comparado ao uso do protocolo IPV6 não apresentaram diferenças na transmissão das mensagens.

Desta forma, pode ser afirmado que a migração do atual ambiente que utiliza o protocolo IPv4 para um ambiente que utiliza um protocolo de nova geração não afeta o desempenho em relação a transmissão das mensagens no ambiente aeronáutico.

8. CONCLUSÕES

No decorrer do texto, foram abordados os aspectos relativos ao ambiente aeronáutico, suas comunicações, bem como aspectos relacionados à integração do Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) no espaço aéreo atualmente utilizado por aeronaves tripuladas. Neste ambiente, a segurança crítica passa a ser um requisito importante para a estrutura dos sistemas que o integram, com o objetivo de garantir que sejam conhecidas e controladas todas as informações que transitam em sua estrutura.

Existem técnicas para que se possam criar condições de riscos que permitam a avaliação deste ambiente crítico, sendo uma destas técnicas o uso da injeção de falhas.

Neste contexto, para esta Tese foi apresentado um modelo onde são definidas as principais falhas e parâmetros que podem interferir na comunicação aeronáutica quanto ao uso da transmissão de dados de forma digital, especificamente, para aeronaves VANT.

Os resultados obtidos demonstram diferenças na interpretação do protocolo CPDLC implementado pela aeronave. Estas diferenças foram causadas em virtude do processamento autônomo para interpretação das mensagens. As diferenças podem ser atribuídas pela atual estrutura de funcionamento do protocolo que demonstrou a necessidade prévia de interpretação humana para processamento das mensagens. Ou seja, pode-se afirmar que esse protocolo ainda necessita de ajustes para utilização por VANT.

Adicionalmente, a análise propunha o uso do protocolo IPv6 como meio de transmissão dos dados digitais. Nota-se que não houve interferência no uso desse protocolo para a simulação proposta. Assim, pode ser entendido que a migração de ambiente está relacionada em um maior nível a questões que envolvem os equipamentos disponíveis para os serviços do que o uso de aplicações neste ambiente.

Em análise final, pode-se aferir que o uso do protocolo CPDLC para comunicação com aeronave VANT ainda necessita de maiores estudos e adequações relativas à capacidade de interpretação por parte da aeronave. A atual estrutura do protocolo considera, em sua grande maioria, que exista uma intervenção humana para a interpretação e aceitação das mensagens. Para que o mesmo serviço prestado pelo protocolo possa ser utilizado, em sua totalidade, por estas aeronaves, seria considerável a proposta de realizar novas implementações nos sistemas embarcados das aeronaves somado a um maior nível de inteligência para que de possa oferecer uma melhor interpretação de mensagens.

8.1. Evolução do Trabalho

Desde o início deste trabalho de doutorado, tinha-se como objetivo avaliar as interferências relativas à comunicação aeronáutica envolvendo as aeronaves VANT com uso do protocolo CPDLC.

Primeiramente foi realizado o levantamento bibliográfico do estado-da-arte relativo ao uso das aeronaves VANT e as comunicações que envolvem o espaço aéreo. Esse levantamento visava fortalecer a proposta da Tese e se dar o foco nas atuais tecnologias possíveis de serem utilizadas para a comunicação digital.

A Figura 38 ilustra os momentos que compuseram o desenvolvimento deste trabalho de doutorado. São apresentadas as fases de maior representatividade que trouxeram resultados para que pudessem ser feitas análises e então a tomada de decisão sobre quais as mudanças ou adequações seriam necessárias para a validação da proposta.

Outro fator de importante relevância para cada um dos momentos apresentados foi que, com os resultados obtidos, pode-se aferir os pontos significativos para que fosse possível a construção do Módulo de Falha ATN. Estes pontos significativos estão relacionados à definição de qual seria a correta forma de captura das mensagens transmitidas e em qual momento deveriam ocorrer.

Figura 38 – Fases da Evolução do Trabalho de Doutorado.

Detalhando as fases contidas na Figura 38, com base nas informações adquiridas, houve a necessidade de aferir, primeiramente a validade da proposta a ser desenvolvida. Nesta primeira fase foi utilizada a Rede Bayesiana, tendo sido definidas as probabilidades de falhas em elementos que compunham o funcionamento da aeronave e elementos da comunicação em conjunto com os elementos de falhas.

Com esta primeira análise pode-se verificar que as falhas propostas realmente atuavam diretamente no comportamento da aeronave VANT quando eram inseridas as falhas. A partir destes primeiros resultados obtidos com a Rede Bayesiana em um ambiente de risco foi possível validar a proposta de estudo de falhas para a comunicação aeronáutica em VANT.

Em um segundo momento, conforme ilustrado na figura, foi utilizado o Método de Monte Carlo com a proposta de criar os cenários possíveis e por meio de sorteios pudessem ser obtidos os resultados necessários para a análise desejada. No entanto, ao aplicar o método para gerar os cenários e então realizar as simulações foi notado que o uso do método limitava as possibilidades de simulações por ocorrer repetições de cenários. Por isso, o uso do método foi deixado de lado e elaborada uma nova possibilidade para que as simulações pudessem ser realizadas e se obtivesse uma gama de resultados e que fosse possível realizar uma melhor análise.

Paralelamente ao desenvolvido o algoritmo do Método de Monte Carlo, foi desenvolvido o Módulo de Falha ATN. A primeira parte que compôs o desenvolvimento do módulo foi interagir com a nova linguagem utilizada que é o LabVIEW 2012, pois a primeira linguagem proposta para conceber o módulo seria a linguagem C. A mudança de linguagem se deu pelo fato de poder construir um módulo que pudesse ser integrado ao ambiente simulado escolhido e que fosse possível utilizá-lo em um ambiente embarcado para ser disponibilizado em futuras pesquisas.

O terceiro momento foi a definição de como poderiam ser aplicadas as probabilidades ao ambiente simulado. As probabilidades de ocorrências das falhas foram aplicadas no Módulo de Falha ATN para que fossem geradas as interferências em decorrência das falhas.

Previamente, visando validar a escolha a ser aplicada ao módulo, foram realizadas inúmeras simulações para que os resultados pudessem ser observados com o objetivo de validar a escolha realizada. Após as simulações prévias foi possível afirmar que as probabilidades definidas eram capazes de oferecerem uma massa de dados que por meio de análise traria resultados satisfatórios.

8.2. Contribuição do Trabalho

O espaço aéreo é um assunto que proporciona inúmeros estudos, abordando as diversas vertentes de pesquisas, que atualmente são consideradas como essenciais para o aumento da segurança de voo.

Os estudos realizados nesta Tese visam contribuir com a análise e os resultados obtidos por meio de simulações para o ambiente aeronáutico, tendo como foco a comunicação com aeronaves VANT.

Assim, a principal contribuição desta Tese relaciona-se à avaliação de interferências causadas por falhas na comunicação entre o ATCo e a aeronave VANT, com uso da transmissão digital de dados via protocolo CPDLC. Foram determinadas quais as

falhas que mais podem causar problemas na comunicação e quais os parâmetros que devem ser utilizados para que seja feita a injeção das falhas.

Outra importante contribuição é a construção do Módulo de Falha ATN para que fosse possível a captura e injeção da falha nas mensagens transmitidas na comunicação. Este módulo tornou possível o uso da técnica de injeção de falhas em um ambiente simulado com as características aeronáuticas.

8.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento desta tese, foram verificadas algumas possibilidades relevantes de estudos futuros decorrentes deste trabalho. Os trabalhos não foram elencados por ordem de relevância, somente representam uma visão de possíveis análises que auxiliariam na segurança do ambiente aeronáutico ao utilizar aeronaves VANT. Tais trabalhos são os seguintes:

1. Determinar a forma de padronização de respostas para o VANT no uso do protocolo CPDLC.
2. Análise de desempenho da ATN, abordando a questão de resiliência da rede.
3. Produzir a injeção de falhas na comunicação em cenários com ocorrências críticas.
4. Estudar a capacidade de inserir inteligência no piloto automático do VANT para que seja capaz de analisar as mensagens e detectar uma mensagem danosa.
5. Realizar a injeção de falhas diretamente em um sistema embarcado real, durante o tratamento das mensagens enviadas por meio do protocolo CPDLC.

Estes trabalhos seriam uma oportunidade de aprimorar a proposta de avaliação de interferências, uma vez que analisa cenários que não foram abordados nesta Tese.

8.4. Considerações Finais

Finalizando, apresenta-se neste momento uma última consideração acerca de todo trabalho de pesquisa que norteou esta Tese.

O uso de aeronaves no transporte de pessoas e cargas, talvez, tenha sido uma das maiores evoluções alcançadas por todas as nações.

Inúmeros são os primorosos trabalhos que visam contribuir para que possamos ter ainda melhores serviços, níveis consideráveis de qualidade nas regiões que cercam os grandes aeroportos, condições seguras em voo, entre outros.

Todas estas preocupações objetivam garantir que todas as decolagens tenham seus pousos assegurados, e que todas estas fascinantes máquinas voadoras cumpram seus papéis no ar e em solo. Esta garantia advém da confiança que seus serviços estejam sendo atentamente observados e analisados, em todos os níveis.

Enfim, que seja garantido o desejo primário de seu laudável inventor, Alberto Santos Dumont, que era poder dar asas aos humanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERONÁUTICA, M. DA. **Regras do Ar e Serviços de Tráfego Aéreo - IMA 100-12**. . [S.l: s.n.]. , 1999

AERONÁUTICA, M. DA. **Plano de Implementação ATM Nacional - PCA 351-3**. . [S.l: s.n.]. , 2012

ARASSE, D. **Leonardo da Vinci**. 1 ed. ed. [S.l.]: William S. Konecky Associates, 1998. p. 560

AVIATIONKNOWLEDGE. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). **AviationKnowledge**, p. 23, 2012.

AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J.-C.; RANDELL, B.; LANDWEHR, C. Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. **IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing**, v. 1, n. 1, p. 11-33, jan 2004.

AVIZIENIS, ALGIRDAS; LAPRIE, JEAN-CLAUDE; RANDELL, BRIAN. **Fundamental Concepts of Dependability**. English. United Kingdom: [s.n.]. , 2001

BAI, H.; ATIQUZZAMAN, M.; IVANCIC, W. QoS Support in ARINC 664 P8 Data Networks: ATN Applications Over TCP/IP Ground-to-Ground Subnetworks. **JOURNAL OF AEROSPACE COMPUTING, INFORMATION, AND COMMUNICATION**, v. 3, p. 374-387, 2006.

BARCELOS, P. P. DE A. **INFIMO - Um Toolkit para Experimentos de Intrusão de Injetores de Falhas**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

BARTH, F. J.; MUSSOI, A. L. G.; STANISCIA, G. F.; TIMOSZCZUK, A. P. **Aeronautical Information Mamagement e a Interoperabilidade de Informações Aeronautica**. (EPUSP, Ed.)VII Simposio de Transporte Aereo. **Anais...** Rio de Janeiro: EPUSP. , 2008

BUNG, M. A.; NAVARRA, C. **Epistemologia: curso de atualização**. Vol. 4 ed. São Paulo: [s.n.], 1987. p. 246

CYTRYNOWICZ, R. **Pioneirismo nos Céus: A história da Divisão de Aeronáutica Do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Narrativa Um, 2006. p. 117

DAWSON, S.; JAHANIAN, F.; MITTON, T.; TUNG, T.-L. **Testing of fault-tolerant and real-time distributed systems via protocol fault injection**. Proceedings of Annual Symposium on Fault Tolerant Computing. **Anais...** [S.l: s.n.], 1996

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AEREO. **Procedimento para Aplicação da Separação Longitudinal Mínima utilizando a Técnica do Número Mach no Atlântico Sul - CIRTRAF 100-18**. . São José dos Campos: DECEA. , 2002

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AEREO. **Veículos Aéreos não Tripulados**. . [S.l: s.n.], 2010

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Inspeção de Voo**. . [S.l: s.n.], 2013

DHAS, C.; MULKERIN, T.; WARGO, C.; NIELSEN, R.; GAUGHA, T. **Aeronautical Related Applications Using ATN and TCP/IP Research Report - NASA/CR-2000-209922**. . Springfield: [s.n.], 2000

DREBES, R. J. **FIRMAMENT: Um Módulo de Injeção de Falhas de Comunicação para Linux**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

EJLALI, A.; MIREMADI, S. G.; ZARANDI, H.; ASADI, G.; SARMADI, S. B. **A hybrid fault injection approach based on simulation and emulation co-operation**. International Conference on Dependable Systems and Networks. **Anais...** [S.l.]: IEEE. , 2003

EUROCONTROL. **What is EUROCONTROL?** Disponível em: <<http://www.eurocontrol.int/content/about-us>>.

FAA. **Aeronautical Telecommunications Network (ATN)**. . [S.l: s.n.], 2010

FAA. **Mission**. Disponível em: <<http://www.faa.gov/about/mission/>>.

FARREL, A. **A Internet e Seus Protocolos - Uma Análise Comparativa**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2005. p. 572

FEIGHERY, P.; HANSON, T.; LEHMAN, T. *et al.* **The Aeronautical Telecommunications Network (ATN) testbed**. 15th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. **Anais...** [S.l.]: IEEE. , 2002

FERRARI, A. T. **Metodologia da Ciência**. Campinas: [s.n.], 1974. p. 242

GALLO, M. A.; HANCOCK, W. M. **Comunicação entre Computadores e Tecnologias de Rede**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. p. 673

GAO, S.; LIU, K.; ZHU, Y.; WANG, J. **Performance of Inter-Domain Routing Protocol in Aeronautical Telecommunication Network**. 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. **Anais...** [S.l.]: IEEE. , out 2008

GIL, F.; ALDECÔA, V. M. **Pipe-SEC: Relatório geral dos módulos implementados**. . [S.l: s.n.]. , 2010

GIL, F. DE O.; JÚNIOR, J. B. C.; JUNIOR, J. R. DE A. *et al.* **PiPE-SEC: Plataforma para Ensaios e Validação da Operação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) no Espaço Aéreo Controlado**. VIII SIMPÓSIO DE TRANSPORTE AÉREO (SITRAER). **Anais...** [S.l.]: EPUSP. , 2009

GIL, F.; JUNIOR, J. B. DE C.; JUNIOR, J. R. DE A. *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**, v. 6, p. 47-60, 2010.

GROUP, C. **Multi-Purpose Control and Display Unit (MCDU)**. Disponível em: <https://www.arinc.com/cf/store/catalog_detail.cfm?item_id=145>. Acesso em: 20 jun. 2013.

HAMRICK, L. Y.; MILLS, M. J. **Impact of controller-pilot data link communications on oceanic ATC service**. Digital Avionics Systems Conference. **Anais...** [S.l.]: IEEE. , 2002

HSUEH, M.-C.; TSAI, T. K.; IYER, R. K. Fault injection techniques and tools. **Computer**, v. 30, n. 4, p. 75-82, abr 1997.

ICAO. **Aeronautical Telecommunications Network (ATN) - Comprehensive ATN Manual (CAMAL)**. . [S.l: s.n.]. , 1999a

ICAO. **Manual of the Technical Provisions for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) - DOC9705**. . [S.l: s.n.]. , 1999b

ICAO. **ICAO Airborne Separation Assurance System (ASAS)**. . [S.l: s.n.]. , 2000

ICAO. **Procedures for Air Navigation Services - DOC 4444 Air Traffic Management**. . [S.l.]: ICAO. , 2001

ICAO. **Global Air Traffic Management Operational Concept - Doc 9854 AN/458.** . [S.l: s.n.]. , 2005

ICAO. **ASIA/PAC ATN IDRP Routing Policy.** . [S.l: s.n.]. , 2009

ICAO. **Manual on Detailed Technical Specifications for the Aeronautical Telecommunication Network (ATN) using ISO/OSI - DOC 9880 Standards and Protocols.** . [S.l: s.n.]. , 2010

ICAO. **Manual for the ATN using IPS Standards and Protocols - Doc 9896.** . [S.l: s.n.]. , 2011

ICAO. **Vision & Mission.** Disponível em: <<http://www.icao.int/about-icao/Pages/vision-and-mission.aspx>>.

ICAO. **Databases and Studies.** Disponível em: <<http://www.icao.int/sustainability/Pages/Tools.aspx>>.

INFRAERO. **Movimento Operacional da REDE INFRAERO.** Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/estatistica-dos-aeroportos.html>>.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet.** 3 edição ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2006. p. 634

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking: International Version: A Top-Down Approach.** 5 edition ed. [S.l.]: Pearson, 2009. p. 864

MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica.** 5. ed. São Paulo: [s.n.], 2003. p. 310

MARTINEZ, R. J.; GIL, P. J.; MARTIN, G.; PEREZ, C.; SERRANO, J. J. **Experimental validation of high-speed fault-tolerant systems using physical fault injection.** Dependable Computing for Critical Applications 7. **Anais...** [S.l.]: IEEE. , 1999

MENDES, L. L. **Abordagem Computacional para Estudo de Redes de Computadores Utilizando o OPNET.** COBENGE 2003 - XXXI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. **Anais...** [S.l: s.n.]. , 2003

MITRE CORPORATION. **Controller Pilot Data Link Communications.** Disponível em: <http://www.mitrecaasd.org/work/project_details.cfm?item_id=110>.

NETTO, C.; KHANNA, M. **ATN over IP models for evaluation**. 22nd Digital Avionics Systems. **Anais...** [S.l.]: IEEE. , 2003

OLIVEIRA, C. P. DE. **Análise dos Modelos para Cálculo de Níveis de Segurança Relacionados a Operação de Veículos Aéreos não Tripulados**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, I. R. DE. **Verificação de Segurança em Confluência de Trajetórias de Aeronaves Utilizando Autônomos Híbridos**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2003.

POPPER, K. S. **A lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo: [s.n.], 1975. p. 282

PRABHU, V.; THOMSON, D. **SWIM Strawman Architecture. Program Manager**. McLean: [s.n.]. , 2007

ROCHA, G. C. **Principais Iniciativas para Aumento da Segurança Operacional no Transporte Aéreo**. Principais Iniciativas para Aumento da Segurança Operacional no Transporte Aéreo. **Anais...** Sao Jose dos Campos: [s.n.]. , 2010

ROSSI, M. A.; LOLLINI, P.; JUNIOR, J. R. DE A.; BONDAVALLI, A. **A Federated Simulation Framework with ATN Fault Injection Module for Reliability Analysis of UAVs in Non-controlled Airspace**. SafeComp 2012 - DEpendable and SEcure Computing for Large-scale Complex Critical Infrastructures (DESEC4LCCI '12). **Anais...** [S.l: s.n.]. , 2012

TANENBAUM ANDREW S. **Computer Networks**. 4 edition ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2003. p. 384

TAYLOR, J. **Preparations for WRC-12**. . Cairo: [s.n.]. , 2010

VERMA, A. K.; AJIT, S.; KUMAR, M. **Dependability of Networked Computer-based Systems**. 1. ed. New York: Springer, 2011. p. 219

YIN, R. K. **Estudo de Caso - Planejamento e Métodos**. 4. ed. [S.l: s.n.], 2010. p. 248

ZUMALDE, A. A. **Avaliação Comparativa entre Técnicas de Programação Defensiva Aplicadas a um Sistema Critico Simulado**. [S.l.]: EPUSP, 2011.

APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO DAS MENSAGENS CPDLC

As mensagens CPDLC utilizadas pela aplicação são caracterizadas como mensagens *Uplink*. Também são definidos os elementos que compõem o vocabulário da aplicação que são os elementos pré-definidos autorizados para a composição da mensagem.

[CLIMB]

CLIMB TO [LEVEL] – subir para o nível solicitado.

MAINTAIN [LEVEL] – manter o nível atual.

[ROUTE]

PROCEED BACK ON ROUTE – retorna informações sobre a rota.

[DESCEND]

MAINTAIN [LEVEL] – manter o nível atual.

DESCEND TO AND MAINTAIN LEVEL] – descer para o nível indicado e manter-se no mesmo.

DESCEND TO [LEVEL] – descer para o nível solicitado.

[EMERG]

IMMEDIATELY CLIMB TO [LEVEL] – alterar o nível de voo de subida imediatamente para o solicitado.

.

IMMEDIATELY DESCEND TO [LEVEL] – alterar o nível de voo de descida imediatamente para o solicitado.

[VOCABULARIES]

LEVEL:FL240:FL250:FL260:FL270:FL280:FL290:FL300:FL310:FL320:FL330:FL340:FL350:FL360:FL370:FL380:FL390:FL400:FL410:FL420:FL430:FL440:FL450 – níveis de voos autorizados para serem enviados pelas mensagens automáticas.

SPEED:300K:320K:350K:M75:M78:M80:M82:M84:M86:M88 – velocidades de voos autorizados para serem enviados pelas mensagens automáticas.

UNIT NAME:MELBOURNE CTR:BRISBANE CTR – zona de controle, que tem objetivo de auxiliar aeronaves em pouso ou decolagem por instrumentos.

UNIT ICAO:YBBR:YMML:YSSY – identificação do usuário autorizado a transmitir mensagens de controle.

ANEXO 1 – ALGORITMO VERIFICADOR

Este algoritmo para verificação das informações das aeronaves foi desenvolvido com objetivo de verificação da existência correta da comunicação entre a aeronave e o ATCo. Foi utilizada a linguagem Python 2.7.3 e a biblioteca PyAIML-0.8.6.

****Copyright: Magali Andreia Rossi / Raphael Vitor Costa dos Santos******

```
import socket
from threading import Thread
from threading import Lock
import time
import aiml

ip = '127.0.0.1'
port = 49000
addr = (ip, port)
num = 1
bot = aiml.Kernel()
bot.learn("acarsbot.aiml")
arq = open("C://aircraft/aircraft.txt", "w")

class LogonThread(Thread):

    def run(self):

        sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
        sock.connect(addr)
        sock.send("from=base&to=YSSY&type=cpdlc&packet=/data2/0//Y/REQUEST LOGON")
        print("<< [0] REQUEST LOGON")
        exp = ExportThread("'DL', 'YSSY', 'cpdlc', 0, , 'AN', 'REQUEST LOGON'")
        exp.start()
        sock.close()

class RespThread(Thread):

    def __init__(self, lock, ms, numup):
        Thread.__init__(self)
        self.lock = lock
        self.ms = ms
```

```

self.numup = numup

def run(self):
    global num
    global bot
    sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    sock.connect(addr)
    lock.acquire()
    resp = bot.respond(self.ms)
    sock.send("from=base&to=YSSY&type=cpdlc&packet=/data2/" + str(num) + "/" + self.numup +
              "/N/" + resp)
    print("<< [" + str(num) + "] " + resp)
    exp = ExportThread("DL", 'YSSY', 'cpdlc', " + str(num) + ", " + self.numup + ", 'N', " + resp + "")
    exp.start()
    num = num + 1
    lock.release()
    sock.close()

class ExportThread(Thread):

    def __init__(self, data):
        Thread.__init__(self)
        self.data = data

    def run(self):
        global arq
        arq.write(self.data + "\n")
        arq.flush()

class PollThread(Thread):

    def run(self):
        sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
        sock.connect(addr)
        sock.send("from=base&to=YSSY&type=poll")
        data = sock.recv(1024)
        if len(data) > 15:
            spl = data.split('{')
            spl4 = spl[1].split(' ')
            spl2 = spl[2].split('/')

```

```

spl3 = spl2[5].split('}')
print(">> [" + spl2[2] + "]" + spl3[0])
exp = ExportThread("'UL', '" + spl4[0] + "', '" + spl4[1] + "', " + spl2[2] + ", " + spl2[3]
    + ", '" + spl2[4] + "', '" + spl3[0] + "'")
exp.start()
if spl2[4] != "NE":
    rsp = RespThread(lock, spl3[0], spl2[2])
    rsp.start()

sock.close()

lock = Lock()
LogonThread().start()
arq.write("@RELATION log \n\n")
arq.write("@ATTRIBUTE link string \n")
arq.write("@ATTRIBUTE atc string \n")
arq.write("@ATTRIBUTE type string \n")
arq.write("@ATTRIBUTE nummsg numeric \n")
arq.write("@ATTRIBUTE numresp numeric \n")
arq.write("@ATTRIBUTE resp string \n")
arq.write("@ATTRIBUTE msg string \n\n")
arq.write("@DATA \n")
arq.flush()
while 1:
    time.sleep(15)
    PollThread().start()

```