Consciência situacional em voo de sistemas aéreos não tripulados

André Luiz Pierre Mattei

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

André Luiz Pierre Mattei

Consciência situacional em voo de sistemas aéreos não tripulados

Tese apresentada ao Instituto de Ciências
Matemáticas e de Computação - ICMC-USP,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Ciências - Ciências de
Computação e Matemática Computacional.
VERSÃO REVISADA

Área de Concentração: Ciências de
Computação e Matemática Computacional

Orientador: Prof. Dr. Claudio Fabiano Motta
Toledo

USP – São Carlos
Agosto de 2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M425c Mattei, André L Pierre
 Consciência situacional em voo de sistemas
 aéreos não tripulados / André L Pierre Mattei;
 orientador Claudio Fabiano Motta Toledo. -- São
 Carlos, 2015.
 257 p.

 Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
 Ciências de Computação e Matemática Computacional) --
 Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
 Universidade de São Paulo, 2015.

 1. VANT. 2. Segurança de Voo. 3. STPA. 4. In-
 Flight Awareness. 5. Consciência Situacional em
 Voo. I. Toledo, Claudio Fabiano Motta , orient. II.
 Título.

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

André Luiz Pierre Mattei

In-flight awareness of unmanned aerial vehicle systems

Doctoral dissertation submitted to the Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, in partial fulfillment of the requirements for the degree of the Doctorate Program in Computer Science and Computational Mathematics.
FINAL VERSION

Concentration Area: Computer Science and Computational Mathematics

Advisor: Prof. Dr. Claudio Fabiano Motta Toledo

**USP – São Carlos
August 2015**

AGRADECIMENTOS

Sendo a vida um caminho feito de etapas e desafios, nada mais aprazível do que agradecer àqueles que nos ajudaram e que tornaram a jornada uma alegria.

Apesar de não ser um religioso praticante, tenho que iniciar agradecendo a Deus, força maior, por finalizar esta etapa importante de minha vida.

Sigo agradecendo à Força Aérea Brasileira, ao ITA e a seu Reitor, Professor Doutor Carlos Américo Pacheco, por permitirem meu aperfeiçoamento. Digo aos três que sempre os agradecerei pela oportunidade oferecida e que buscarei sempre melhorar o Brasil com os conhecimentos adquiridos.

Agradeço muito ao ICMC, pois seus Funcionários e seus Professores criaram o ambiente acadêmico agradável e de alto nível que encontrei e desfrutei.

Dr. Elói Fonseca, muito obrigado pela amizade e pelo suporte em diversos momentos do meu programa de doutoramento. A sua capacidade pessoal e visão técnica foram muito admiradas.

SO Pedro Euphrásio, obrigado pelas ricas discussões técnicas e presença agradável. Trabalhamos juntos por 15 anos e tenho somente boas lembranças.

Um agradecimento forte ao Professor Doutor Onofre Trindade, amigo que admiro e que teve, e ainda tem, uma enorme influência em meus trabalhos acadêmicos, particularmente no tema central desta tese. Obrigado Onofre!

Com entusiasmo eu também agradeço ao Professor Doutor Cláudio Fabiano Motta Toledo. Soube me aconselhar e me guiar durante o programa de doutoramento de forma clara e direta. Eu tive muita sorte em tê-lo ao lado. Com orgulho, eu o chamo de amigo e o agradeço. Obrigado Cláudio!

Tenho que agradecer de forma muito especial à minha família. Contudo, tenho dificuldades em expressar a minha gratidão e reconhecimento à paciência e ao apoio que recebi deles.

Meu pai, Guilherme, ensinou-me a lutar e a acreditar em mim. Minha mãe, Clélia, deu o amor necessário à infância para criar um adulto confiante. Meus queridos irmãos, Dennis, Alexandre e Adriana, obrigado por compartilharem a vida comigo.

Sara, minha amada esposa, Felipe, Rafael, Bárbara e Vinícius, meus amados filhos, vocês são a razão de cada respiração minha e motivo de minha imensa alegria em viver. Muito obrigado por compreenderem a minha ausência e me apoiarem mesmo quando pouco fiz por merecer. Eu os amo muito. Cada passo nesta vida faz sentido porque vocês estão comigo. Estou casado faz 26 anos e agradeço 1000 vezes por cada dia que passei com você, Sara.

Obrigado.

RESUMO

Este trabalho apresenta os principais conceitos de um modelo de referência, chamado de Consciência Situacional em Voo (*In-Flight Awareness*, IFA), e sua implementação embarcada IFA²S (*In-Flight Awareness Augmentation System*). IFA é um conceito novo e realista e voltado à melhoria da segurança de voo de VANTs. IFA²S tem o potencial de alavancar confiabilidade dos VANTs aos níveis encontrados na aviação geral. Ele aumenta a consciência aeronave tanto em relação a si mesma e seu ambiente circundante e, ao mesmo tempo reconhece restrições da plataforma para agir de acordo com algoritmos de decisão pré-definidos. Este trabalho apresenta o IFA como consequência dos requisitos de segurança estabelecidos através da metodologia STPA, faz uma avaliação quantitativa do impacto do IFA²S no risco operacional dos VANTs e apresenta orientações de implementação em hardware. Simulações de validação são realizadas com uso do software Labview e do simulador de voo XPlane.

Palavras-chave: STPA, VANT, In-Flight Awareness, Consciência Situacional em Voo, Segurança de Voo.

ABSTRACT

This work presents the key concepts of IFA, In-Flight Awareness, and its implementation IFA²S (In-Flight Awareness Augmentation System). IFA is a novel and realistic concept intended to enhance flight safety. IFA²S has the potential to leverage UAVs' reliability to the levels of general aviation aircraft. It increases aircraft awareness regarding both itself and its environment and, at the same time recognizes platform constraints to act in accordance to predefined decision algorithms. This paper presents the IFA as a consequence of the safety requirements established using STPA methodology, a quantitative assessment of the impact of IFA²S in the operational risk of UAVs as well as suggestions for hardware implementation. Simulations are carried out using Labview software and the flight simulator XPlane.

Keywords: STPA, In-Flight Awareness, UAV, flight safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 – a) Curtiss N-9 usado em 1917 em testes preliminares como VANT bombardeiro, (AIRCRAFT-ENCYCLOPEDIA, 2013); b) VANT OQ-2, usado como alvo aéreo, da empresa americana Radioplane Corporation, 1935, (KATZ, KENNETH P., AND KATZ AEROSYSTEMS, 2013).....	6
Figura 1-2 – Míssil de cruzeiro ou VANT? V1 alemã, usada no final da II Grande Guerra contra o Reino Unido, (THE BATTLEFIELD SITE, 2013).	6
Figura 1-3 – Um VANT Teledyne Ryan Model 147 (USAF AQM-34) sendo lançado a partir de uma aeronave DC-130.....	8
Figura 1-4 – VANT Predator. (GENERAL ATOMICS, 2013)	9
Figura 1-5– Pilotos são treinados para operar aeronaves com diferentes desempenhos de forma segura em diferentes situações de voo. (AVIATION TROUBLESHOOTING, 2010), (CECOMSAER, 2013).....	14
Figura 1-6– Estação de controle de um VANT. O piloto está sentado ao fundo. (PESTANA, 2011).	17
Figura 2-1– Distribuição por fonte dos trabalhos considerados na seleção final.	28
Figura 2-2– A imagem à esquerda mostra o piloto da NASA Mark Pestana e tem o objetivo de mostrar que ele pode contar apenas com os olhos na pilotagem do VANT Ikhana. A imagem à direita mostra o centro de controle, o posto de pilotagem ao fundo e os demais operadores envolvidos na operação. Figuras extraídas da referência (PESTANA, 2011).	34
Figura 2-3– O modelo conceitual criado por em (PASTOR, ROYO, <i>et al.</i> , 2012) visa criar condições para uma tomada rápida de decisão.	46
Figura 2-4– Arquitetura adotada para implementação do algoritmo CSAT, conforme referência (HOW, FRASER, <i>et al.</i> , 2009).....	53
Figura 2-5– Opções para embarcar sistema ADS-B em VANTs pequenos. Adaptado de (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013)	62
Figura 3-1– O SisVANT envolve uma estação de controle, a aeronave (VANT), um eventual <i>relay</i> de comunicações e um enlace rádio para controle da plataforma aérea e sua carga útil.....	66
Figura 3-2– Camadas formam a estrutura de segurança para evitar colisões em voo, (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013).	68
Figura 3-3– A integração dos VANTs no Espaço Aéreo deve levar em consideração as interfaces entre o SisVANT e o ambiente aeronáutico. Adaptado de (WEIBEL e HANSMAN, 2005).....	69
Figura 3-4– Áreas indicadas pela FAA que requerem pesquisa e desenvolvimento para integração dos VANTs no espaço aéreo. (FAA, 2013)	71

Figura 3-5– Evolução de acidentes aeronáuticos com as associadas fatalidades ao longo da história ocorridos com aeronaves civis de transporte de passageiros com mais de 14 pessoas a bordo. Adaptado de (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2013).	73
Figura 3-6– Fatores contribuintes para os acidentes ocorridos na aviação geral entre 2003 e 2012. (CENIPA, 2013), pg 26.	74
Figura 3-7– Estatística para os acidentes ocorridos na aviação geral entre 2003 e 2012 por tipo de evento. CFIT é o acrônimo para <i>Controlled Flight Into Terrain</i> . (CENIPA, 2013), pg 26.	75
Figura 3-8– Acidente do voo Air France 447.....	76
Figura 3-9– Serviços proporcionados para evitar colisões em voo. Adaptado de (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013).....	77
Figura 3-10– VANTs operados pelas Forças Armadas dos EUA cujas causas de acidentes estão reportadas por (WILLIAMS, 2004). a) Hunter (http://www.northropgrumman.com/); b) Shadow e c) Pioneer (www.aaicorp.com); d) Predator (http://www.ga.com/).	79
Figura 3-11– Causas de acidentes envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).	80
Figura 3-12– Composição dos Fatores Humanos envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).	81
Figura 3-13– O Reino Unido perdeu 450 VANTs nos conflitos do Afeganistão e Iraque devido a erros de pilotagem, falhas mecânicas e pousos de emergência em território hostil: a) 1 <i>Reaper</i> ; b) 9 <i>Hermes</i> 450; c) 412 <i>Desert Hawk</i> ; 25 <i>Black Hornet</i> e <i>Tarantula Hawk</i> (d e e, respectivamente). (THE GUARDIAN, 2013)	82
Figura 3-14 – Orientação normativa para desenvolvimento e operação de aeronaves. (SAE AEROSPACE, 2010).	88
Figura 3-15– A consciência situacional pode ser explorada com diversos enfoques: Piloto do VANT, Comandante do Centro de Controle de Missão ou Aeronave.	89
Figura 3-16– Consciência Situacional exige a compreensão de diversos dados em uma ordem coerente para a tomada de decisão. Adaptado de (ENDSLEY, 1995).	90
Figura 3-17– Processo sequencial para evitar ou mitigar acidentes com o Vant.	91
Figura 4-1– Cadeia causal de eventos descrito em forma do alinhamento dos buracos em fatias de um queijo suíço.	94
Figura 4-2– Estrutura hierárquica de controle de segurança para a indústria de VANTs.	98
Figura 4-3– Estrutura de Controle do Sistema VANT.	100
Figura 4-4– Estrutura de Controle Interna do Sistema VANT proposta.	110

Figura 5-1– Fluxograma de decisão IFA ² S de alto nível.	120
Figura 5-2– A integração do IFA na aeronave depende do projeto piloto automático.	124
Figura 6-1– O XPlane foi escolhido como simulador de voo devido à facilidade de integração com o Labview e realismo na criação de cenários.....	127
Figura 6-2– A leitura dos dados provenientes do XPlane é realizada no diagrama de blocos do Labview e é usada no controle da aeronave e da lógica do IFA ² S.	127
Figura 6-3– O Labview foi escolhido para ambiente da máquina de estados destinada a controlar o Xplane e testar as soluções IFA ² S.....	128
Figura 6-4– Interface do XPlane para seleção dos dados enviados ao Labview.....	128
Figura 6-5– Máquina de estados criada para atender aos requisitos de segurança identificados.	130
Figura 6-6– Diagrama de blocos geral do estado “Idle”.	133
Figura 6-7– A leitura de arquivos previamente preparados é realizada no estado “Init”.	135
Figura 6-8– À esquerda, tem-se a janela para seleção de eventos que devem ser identificados e mitigados pelo IFA ² S e, à direita, tem-se a os alertas de eventos para acompanhamento e eventual intervenção do operador.....	135
Figura 6-9– Janela para controle da aeronave.	136
Figura 6-10– Um sistema de controle automático foi criado no Labview para comandar a aeronave no XPlane e está presente em todos os estados, excetuando-se o “Init”.....	137
Figura 6-11– Subrotina de controle de voo da aeronave criada no Labview. A janela da esquerda é a interface e a da direita apresenta a malha de controle usada.	137
Figura 6-12– Janelas para apresentação de dados e controle de eventos de distância máxima para a Base (esquerda) e de Meio Ambiente (direita).	138
Figura 6-13– A janela da esquerda apresenta os dados e controle dos waypoints usados na navegação e a janela da direita o painel de instrumentos e controle de eventos dos sistemas internos.....	139
Figura 6-14– Janela de controle para evitar colisões em voo à esquerda e mapa de navegação à direita.	140
Figura 6-15– A janela da esquerda mostra diversas medidas efetuadas em voo e a da direita mostra os waypoints da rota prevista e em uso.	140
Figura 6-16– Janela com as coordenadas dos vértices que determinam uma área proibida.	141
Figura 6-17– O detalhe mostrado na seta mostra uma máquina de estados dentro do “Idle” para seleção e mudança de estado.	142

Figura 6-18– A subrotina “ <i>S&A_Idle</i> ” monitora a distância e a diferença de altitude das aeronaves ao redor do VANT no estado “ <i>Idle</i> ” e provoca a mudança para o estado “ <i>Diagnosis S&A</i> ” e eventualmente para “ <i>Action_S&A</i> ” para evitar colisão em voo...	143
Figura 6-19– Parte central do diagrama de blocos do estado “ <i>Diagnosis S&A</i> ”.....	144
Figura 6-20– Geometria usada para determinar a distância da aeronave aos limites da área proibida.....	145
Figura 6-21– Estado “ <i>Forbidden Area</i> ” para evitar sobrevoos de área proibida.....	145
Figura 6-22– Parte central do diagrama de blocos do estado “ <i>Idle</i> ” com as subrotinas que monitoram alguns subsistemas da aeronave.....	146
Figura 6-23– Parte do diagrama de blocos do estado “ <i>IS</i> ” para decisão sobre mudança de estado.....	147
Figura 6-24– Estado “ <i>AbA</i> ” para correção de atitudes perigosas corrige ângulos excessivos de rolamento e arfagem.....	148
Figura 6-25– Abertura do paraquedas em voo da aeronave Arara na Universidade de Purdue, EUA. Imagem cedida pela empresa AGX.....	149
Figura 6-26– Medidas da velocidade vertical em voo da aeronave Arara na Universidade de Purdue, EUA. Imagem cedida pela empresa AGX.....	150
Figura 6-27– Interface do XPlane para gerar diferentes condições meteorológicas. A seta 1 mostra os controles para alterar o aspecto visual a partir da cabine da aeronave; A seta “2” mostra os controles de turbulência no eixo de rolamento e os ventos em baixa altitude. Para provocar as variações na velocidade vertical, fizeram-se variações nas duas barras indicadas com o número “3”.....	152
Figura 6-28– Quatro níveis de intensidade de turbulência vertical usadas nos testes..	152
Figura 6-29– Velocidade vertical medida em voos de uma hora em quatro níveis de intensidade de turbulência vertical.....	153
Figura 6-30– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 0 e 1.....	154
Figura 6-31– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 1 e 2.....	155
Figura 6-32– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 0 e 2.....	155
Figura 6-33– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 1 e 3.....	155
Figura 6-34– Interface do XPlane para seleção de turbulência de rolamento. A imagem da esquerda mostra a seleção de turbulência nível W0 e a da direita nível W2.....	157

Figura 6-35– Medida do ângulo de rolamento em voos de 1 hora nas condições de turbulência níveis W0, W1, W2 e W3.....	157
Figura 6-36– Medida do ângulo de rolamento em voos de 1 hora cada nas condições de turbulência níveis W0 e W3.	158
Figura 6-37– Desvio padrão das medidas do ângulo de rolamento nas condições de turbulência níveis W0 e W3.	158
Figura 6-38– O contador de ocorrências de turbulência verifica o número de vezes em que os limites de turbulência no eixo vertical e de rolamento (longitudinal) são ultrapassados.....	160
Figura 6-39– Número de ocorrências de turbulência simultânea nos eixos vertical e longitudinal em função de limites mínimos estabelecidos para os respectivos desvios padrão.	160
Figura 6-40– Nas simulações, a proa da aeronave é medida a partir do eixo vertical e é positiva no sentido horário.	163
Figura 6-41– Aeronave com ângulo de 270 graus, sem necessidade de desvio de zona proibida e apenas uma opção de zona atrativa ao redor da proa inicial produziu 100% de acerto.	164
Figura 6-42– Aeronave com ângulo de 227 graus produziu 100% de acerto nas simulações.	164
Figura 6-43– Aeronave com ângulo de 270 graus produziu 59% de acerto.....	165
Figura 6-44– Aeronave com ângulo de 270 graus e com duas zonas atratoras nas vizinhanças da proa produziu 71% de acerto.	166
Figura 6-45– Aeronave com ângulo de 73 graus produziu 79% de acerto.....	167
Figura 6-46– Aeronave com ângulo de 358 graus produziu 80% de acerto.....	168
Figura 6-47– Aeronave com ângulo de 335 graus produziu 84% de acerto.....	169
Figura 6-48– Aeronave com ângulo de 176 graus produziu 95% de acerto.....	170
Figura 6-49– Aeronave com ângulo de 101 graus produziu 87% de acerto.....	171
Figura 6-50– Aeronave com ângulo de 118 graus produziu 14% de acerto.....	172
Figura 7-1– A proximidade de um intruso provoca a mudança de estado para evitar colisão em voo.	175
Figura 7-2– Na janela de alertas, à esquerda, o botão para permitir detecção de intrusos está selecionado, o LED correspondente aceso e os dados da aeronave mais próxima apresentados. Uma vez selecionado teste de colisão, o VANT se dirige diretamente para a aeronave intrusa mais próxima (janela da direita).	176

Figura 7-3– A janela de S&A permite o estabelecimento dos limites horizontal e vertical desejados, a visualização de posição das aeronaves intrusas e a eventual mudança de rota.	176
Figura 7-4– Uma vez que a aeronave intrusa cruze os limites vertical e horizontal estabelecidos, um alerta é apresentado ao operador e a aeronave altera a rota.	177
Figura 7-5– Durante a manobra para evitar colisão em voo, a rota pré-definida é abandonada e um waypoint criado para direcionamento do VANT.	177
Figura 7-6– Uma vez evitado o choque e fora dos limites de emergência, a aeronave retorna à missão original.....	178
Figura 7-7– O estado “ <i>Forbidden Area</i> ” é acionado quando a aeronave se aproxima de uma zona em que o sobrevoos é proibido.	179
Figura 7-8– Para que o sobrevoos de Zonas Proibidas seja evitado, é necessário que o operador acione o botão “ <i>Avoid Forbidden</i> ” no painel gerador de eventos do Labview.	180
Figura 7-9– O estado “ <i>Forbidden Area</i> ” provoca a mudança de rota do VANT criando um waypoint auxiliar para evitar o sobrevoos da Zona Proibida e acende luzes de aviso para alertar o operador.	180
Figura 7-10– Novo waypoint criado para servir ao desvio de rota para evitar sobrevoos da zona proibida.	181
Figura 7-11– Da esquerda para a direita, sequencia da rota percorrida pela aeronave para evitar a zona proibida.	181
Figura 7-12– Após evitar a zona proibida, o VANT retorna à navegação anterior (direita) e apaga as luzes de aviso (esquerda).	181
Figura 7-13– Da esquerda para a direita, sequencia da rota percorrida pela aeronave para evitar a zona proibida.	182
Figura 7-14– Dois instantes evidenciando que, após evitar a zona proibida, o VANT retorna à navegação anterior e se dirige ao waypoint previamente selecionado.	182
Figura 7-15– A falha em um dos sistemas da aeronave sob monitoramento realiza uma verificação de limites para decidir a ação.....	183
Figura 7-16– Falha de sistema da aeronave com comando de retorno à Base. A janela da esquerda mostra as luzes de aviso de retorno à Base (amarelo) e de falha de sistema interno (vermelho) acesas. A janela da direita mostra que o próximo waypoint contém a numeração 99, correspondente à posição da base.	184
Figura 7-17– Em caso de retorno à Base, a rota predefinida, tabela da esquerda, é substituída pela posição da Base, tabela da direita, para a navegação da aeronave.	185
Figura 7-18– O comando de retorno à Base faz com que a aeronave navegue até as coordenadas da base. A janela da esquerda (a) mostra a rota da aeronave até a posição da	

base e a realização de voo circular (<i>Loiter</i>). A janela da direita (b) mostra que a aeronave retorno à navegação original se o comando de retorno à Base (ou de <i>Loiter</i>) for cancelado pelo operador.	185
Figura 7-19– Se o ângulo de rolamento ou de arfagem exceder os limites estabelecidos, o estado “ <i>AbA</i> ” realiza a correção da atitude e toma a decisão de retornar ao estado anterior ou abortar a missão.	186
Figura 7-20– As medidas de desvio padrão da velocidade vertical e rolamento permitem a identificação de turbulência atmosférica, forçam a mudança de estado e auxiliam na tomada de decisão.	188
Figura 7-21– Condições de turbulência nível 1 inserida no XPlane para teste do mecanismo de identificação de turbulência criado no Labview.	189
Figura 7-22– Condições de turbulência nível 2 inserida no XPlane para teste do mecanismo de identificação de turbulência criado no Labview.	189
Figura 7-23– Rota percorrida pela aeronave durante os testes de turbulência com duração de 1 hora.	190
Figura 7-24– Tempo para identificação de condição atmosférica adversa.	191
Figura 7-25– O estado “ <i>Alt</i> ” é acionado sempre que a altura da aeronave em relação ao solo estiver abaixo do limite previsto.	192
Figura 7-26– O estado “ <i>Alt</i> ” foi acionado sempre que a altura da aeronave em relação ao solo fosse menor que 1.500ft.	193
Figura 7-27– O estado “ <i>Alt</i> ” permite a recuperação automática de baixa altitude a partir dos estados “ <i>Idle</i> ”, “ <i>Return Home</i> ” e “ <i>Loiter</i> ”.	193
Figura 7-28– O algoritmo genético é usado para cálculo automático de rota em voo.	194
Figura 7-29– Rota calculada pelo AG (esquerda) e realizada pelo Labview (direita), sendo 100 graus a proa inicial da aeronave e considerando as zonas predefinidas.	195
Figura 7-30– Rota calculada pelo AG (esquerda) e realizada pelo Labview (direita), sendo 90 graus a proa inicial da aeronave e considerando as zonas predefinidas.	196
Figura 7-31– Rota calculada pelo AG (esquerda) e realizada pelo Labview (direita), sendo 350 graus a proa inicial da aeronave e considerando as zonas predefinidas.	196
Figura 8-1– Em uma FTA, dois elementos A e B podem relacionar por meio de portas E (figura i) ou de portas OU (figura ii).	200
Figura 8-2– Exemplo hipotético de árvore de falhas de um piloto automático de um VANT. (MURTHA, 2009)	201
Figura 8-3– Representação gráfica dos limites inferior e superior para a falha do tipo eventual de software <i>ps</i> , sendo plausibilidade (P) o inferior e a crença (B) o superior.	205

Figura 8-4– Representação gráfica dos limites inferior e superior da plausibilidade (P) o inferior e a crença (B) o superior para a falha do tipo eventual de software p_{sc}	207
Figura 8-5– VANT Tiriba.....	208
Figura 8-6– Árvore de falhas de sistemas da aeronave Tiriba.	208
Figura 8-7– Árvore de falhas devido a causas desconhecidas da aeronave Tiriba.....	209
Figura 8-8– Representação do pouso forçado de um VANT em relação a uma construção humana ou pessoa.....	214
Figura 8-9– Influência do $\epsilon_{ifa,ar}$ na razão esperada de colisão, F_c , com $\lambda=5.10^{-3}$ e $\rho_0=2,19.10^{-19} \text{ m}^{-3}$	218
Figura 8-10– Influência do $\epsilon_{ifa,ar}$ taxas de colisões $F_{ar,p}$ com pessoas devido à uma colisão do VANT com outra aeronave no ar, com $\lambda=5.10^{-3}$ e $\rho_0=2,19.10^{-19} \text{ m}^{-3}$	219
Figura 8-11– Influência do $\epsilon_{ifa,ar}$ na taxa de colisão $F_{ar,p}$ com pessoas devido à uma colisão do VANT com outra aeronave no ar, com $\lambda=5*10^{-3}$, $\epsilon_{ifa,g}=0$ e com ρ_0 em m^{-3}	219
Figura 8-12– Impacto do $\epsilon_{ifa,g}$ na taxa de fatalidades com aumento da concentração de pessoas, com $\lambda=5*10^{-3}$ e $\rho_0=2,19.10^{-19} \text{ m}^{-3}$	220
Figura 8-13– Impacto do $\epsilon_{ifa,g}$ na taxa de fatalidades com aumento da concentração de pessoas, e variação de λ	220
Figura 9-1– Arquitetura de integração do IFA ² S.....	225
Figura 9-2– Exemplo de implementação simples do IFA ² S usando portas lógicas.	226
Figura 9-3– Esquemático do exemplo de implementação simples do IFA ² S.	227
Figura 9-4– Máquina de estados gerada utilizando o SCADE.....	229
Figura 9-5– Modelo criado no SCADE para geração de códigos em C para cálculo de alcance do VANT elétrico.	229
Figura 9-6– Estrutura do código em C gerado automaticamente pelo SCADE para cálculo atualizado de alcance durante o voo de um VANT elétrico.	230
Figura 9-7– Modelo criado no SCADE para geração de códigos em C para cálculo de direção e velocidade do vento.	230
Figura 9-8– Os blocos implementados em software usando gráfico de fluxo se referem ao domínio digital.....	232
Figura 9-9– Placa USRP da empresa Ettus, portando um FPGA Spartan6.....	233
Figura 9-10– A alimentação da placa USRP e o controle da empresa Ettus foi feito através de um laptop.	233

Figura 9-11– Diagrama de fluxo para transmissão e recepção de dados usando modulação BPSK.	234
Figura 9-12– Resultados obtidos na recepção dos sinais no tempo e em frequência, esquerda e direita respectivamente.	234

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 – Algumas ações de Força Aérea, conforme preconizado pelo Comando da Aeronáutica. (BRASIL, 2012).....	11
Tabela 1-2 – Taxonomia de missões de VANTs civis e militares. (BRASIL, 2012) (NEHME, CUMMINGS e CRANDALL, 2006).....	12
Tabela 2-1. Trabalhos preliminares.	26
Tabela 2-2. Trabalhos pré-selecionados.	27
Tabela 2-3. Trabalhos selecionados por fonte.	28
Tabela 2-4. Níveis de automação, adaptado de (CHEN, BARNES e HARPER-SCIARINI, 2011).....	41
Tabela 2-5. Níveis de Controle e Automação para um VANT usando o sistema IFA. Adaptado de (ENDSLEY, 1996).....	43
Tabela 3-1. Causas de acidentes envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).....	79
Tabela 3-2. Composição dos Fatores Humanos envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).....	80
Tabela 3-3. Exemplo de matriz de avaliação de risco.	86
Tabela 4-1. Ações de Controle Inseguras.	101
Tabela 4-2. Requisitos de Alto Nível.	103
Tabela 5-1. A taxonomia auxilia na definição dos sensores que irão compor o IFA ² S em um caso específico.....	122
Tabela 6-1. Estados definidos a partir dos requisitos identificados.	130
Tabela 6-2. Índice de alarme na identificação de turbulência vertical em relação ao limite inferior. Foram realizados voos de uma hora em cada uma das condições.....	156
Tabela 6-3. Índice de alarme na identificação de turbulência no eixo de rolamento em relação ao limite inferior. Foram realizados voos de uma hora em cada uma das condições.	159
Tabela 6-4. Parâmetros do algoritmo utilizado nos testes de recálculo de rota com AG.	162
Tabela 6-5. Resultados das simulações com o AG variando a proa da aeronave. Foram realizados 200 testes em cada caso, totalizando 2.000 testes.	163

Tabela 7-1. Resultados do modo para evitar colisões em voo do IFA2S.....	178
Tabela 7-2. Tempo para identificação de condição atmosférica adversa com variação dos limites mínimos de desvio padrão (SD) da velocidade vertical e do ângulo de rolamento.	191
Tabela 7-3. Medida de número de eventos para diferentes condições atmosféricas com variação dos limites máximos de ângulo de rolagem e de desvio padrão em altitude.	192
Tabela 8-1. Valores de Plausibilidade (P), Crença (B) e Massa (m) obtidos a partir das Equações (8.9).	206
Tabela 8-2. Determinação da probabilidade de falha da aeronave devido à falha de seus sistemas internos, λ	209
Tabela 8-3. Parâmetros das aeronaves na área de missão do VANT em análise utilizados para a avaliação de risco.	217
Tabela 8-4. Dados sobre o VANT em análise para avaliação de risco.	217
Tabela 8-5. Características da área de operação do VANT.....	218

Lista de Siglas e Abreviaturas

ADS - Autodefesa de Superfície
Ap AA - Apoio Aéreo Aproximado
ARP - Aeronaves Remotamente Pilotadas
AS - Anti-submarino
ASIC - Application-Specific Integrated Circuit
ASSP - Application-Specific Signal Processor
ATC - *Air Traffic Control*
Atq - Ataque
CAA - Controle Aéreo Avançado
CAD - *Computer-Aided Design*
CAV - Controle e Alarme em Voo
CDS - CubeSat Design Specification
CFIT - *Controlled Flight Into Terrain*
COTS - *Commercial Off-The Shelf*
CS - Consciência Situacional
CSAR - Busca e Salvamento em Combate
DA - Defesa Aérea
DDC - *Digital Down Converter*
DSP - *Digital Signal Processing*
DUC - *Digital Up Converter*
FMEA - *Failure Modes and Effect Analysis*.
FMES - *Failure Modes and Effect Summary*.
FPGA - *Field-Programmable Gate Array*
FTA - *Fault Tree Analysis*
GNSS - Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS - Sistema de Posicionamento Global
GUV - *Ground Unmanned Vehicles*
IDE - *Integrated Development Environment*
IFA - *In-Flight Awareness*
IFA²S - *In-Flight Awareness Augmentation System*
Interf Elt - Interferência Eletrônica
Intlg Op - Inteligência Operacional
IP - *Internet Protocol*

ISE - *Integrated Synthesis Environment*
 LNA - *Low Noise Amplifier*
 LUT - *Lookup Table*
 MDA - *Model-Driven Architecture*
 Min Ae - Minagem Aérea
 MLR - *Mission Level Requirements*
 MOSA - *Mission Oriented Sensor Array*
 NRE - Non-Recurring Engineering
 P Com-Ar - Posto de Comunicação no Ar
 PA - *Power Amplifier*
 PATMAR - Patrulha Marítima
 PAVE - *Pilot-in-command, Aircraft, Environment and External pressures.*
 PdF - Probabilidade de Falha
 Rec A - Reconhecimento Armado
 Rec Ae - Reconhecimento Aéreo
 RPAS - *Remotely-Piloted Aircraft System*
 RTL - *Register Transfer Level*
 S&A - *Sense and Avoidance*
 SAR - Busca e Salvamento
 SDAI - Supressão de Defesa Aérea Inimiga
 SDR – *Software Defined Radio*
 Seg Inst - Segurança das Instalações
 SISVANT - Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado
 SSP - *Smart Sensor Protocol*
 STPA - *System Theoretic Process Analysis*
 SYS - System Requirements
 TAL - Transporte Aéreo Logístico
 TRL - *Technology Readiness Level*
 UHF - *Ultra-High Frequency*
 VANTs - Veículos Aéreos Não Tripulados
 Var - Varredura
 VHDL - *Very High-level Design Language*
 VHF - *Very-High Frequency*
 VSNTs - Veículos de Superfície Não Tripulados

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações.....	v
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Siglas e Abreviaturas	xvi
1 Introdução.....	1
1.1 Definição de VANT	4
1.2 Breve Histórico.....	5
1.3 Aplicações Militares e Civis	10
1.4 Motivação.....	13
1.4.1. Preparo para Situações Emergenciais em Voo.....	13
1.4.2. O papel do piloto na aviação não tripulada.....	16
1.5 Objetivos	17
1.5.1. Específico	17
1.5.2. Gerais	18
1.6 Inovações do Trabalho de Tese.....	18
1.7 Estrutura do Trabalho	19
1.8 Conclusão.....	21
2 Revisão da Literatura	22
2.1 Considerações Iniciais	22
2.2 Planejamento da Revisão	22
2.3 Condução da Revisão.....	26
2.4 Resultados da Revisão Sistemática	28
2.4.1. Definição de Consciência Situacional	30
2.4.2. Conceitos Preliminares	35
2.4.3. Revisão de Projetos de Sistemas de Consciência Situacional.....	42
2.4.4. Avaliação	47
2.4.5. Tecnologias Facilitadoras	50
2.5 Considerações Finais	63
3 Conceitos Fundamentais.....	64
3.1 Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados – SisVANTs	64
3.2 Integração dos VANTs no Espaço Aéreo	67
3.3 Análise do Risco Operacional	72
3.3.1. Acidentes Aeronáuticos.....	72
3.3.2. Acidentes Aeronáuticos com VANTs.....	77

3.3.3. Aceitação de Risco na Indústria Aeronáutica.....	83
3.4 Aeronavegabilidade e Regulamentos Associados	86
3.5 Conceitos Preliminares sobre Consciência Situacional	88
3.6 Considerações Finais	91
4 Determinação de Requisitos de Segurança	92
4.1 Metodologias Tradicionais: Cadeia de Falhas e Modelos de Causalidade	93
4.2 Análise STPA da Operação de VANTs.....	96
4.2.1. Acidentes e Perigos em nível de Sistema	96
4.2.2. Identificação da Malha de Controle do Sistema VANT	97
4.3 Requisitos de Segurança de Alto Nível.....	102
4.4 IFA²S como consequência dos Requisitos de Segurança obtidos com uso do STPA	108
4.5 Conclusões	111
5 Definição dos Conceitos de IFA e de IFA²S.....	112
5.1 Conceitos Preliminares sobre IFA e IFA²S.....	112
5.2 Dimensões do IFA e Definição do IFA²S.....	116
5.3 Processo de Definição e Integração do IFA²S na Aeronave	124
5.4 Conclusão.....	125
6 Simulação do IFA²S usando Labview e XPlane	126
6.1 Ambiente de Simulação	126
6.2 Máquina de Estados.....	129
6.3 Implementação da Máquina de Estados no Labview	132
6.4 Implementação das Soluções para Eventos na Máquina de Estados	141
6.4.1. Colisões em Voo.....	142
6.4.2. Área Proibida.....	144
6.4.3. Falha em Subsistema Interno.....	145
6.4.4. Atitude Anormal.....	147
6.4.5. Meteorologia.....	148
6.4.6. Baixa Altitude.....	160
6.4.7. Planejamento de Pouso de Emergência Automático.....	161
6.5 Conclusões	173
7 Resultados da Simulação em IFA²S em Labview.....	174
7.1 Colisão no Ar	174
7.2 Sobrevoos de Área Proibida	179
7.3 Falha em Sistemas da Aeronave	182
7.4 Atitude Anormal	186

7.5	Turbulência Atmosférica.....	187
7.6	Recuperação Automática de Baixa Altitude.....	192
7.7	Pouso de Emergência usando Algoritmos Genéticos	194
7.8	Conclusões	196
8	Avaliação Quantitativa do Impacto do IFA²S no Risco Operacional dos VANTs	198
8.1	FMEA e FTA	198
8.2	Teoria da Evidência de Dempster-Shafer	201
8.3	Árvore de Falhas da Aeronave Tiriba.....	207
8.4	Análise de Risco na Presença de Incerteza	210
8.4.1.	Probabilidade de Choque no Ar.....	211
8.4.2.	Pouso Forçado	213
8.4.3.	Taxa de Colisão com Pessoas e Construções	215
8.5	Estimativas de Influência do IFA²S nas Taxas de Colisão	216
8.6	Interpretação dos Resultados.....	221
8.7	Conclusões	222
9	Arquitetura para Projeto do IFA²S em Hardware	224
9.1.	Arquitetura de Integração	224
9.2.	Solução utilizando portas lógicas.....	226
9.3.	Máquina de Estados criada em ambiente SCADE.....	227
9.4.	Desenvolvimento de Rádio por Software para comunicação de dados	231
9.5.	Conclusões	235
10	Conclusões Finais	236
	Referências	240
	Glossário	255

1 Introdução

A crescente utilização e os altos índices de acidentes de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), também chamados de Aeronaves Pilotadas Remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft, RPA*), têm provocado discussões e questionamentos sobre os riscos envolvidos na sua operação sobre regiões povoadas e de colisão com outras aeronaves tripuladas, seja em espaço aéreo segregado ou não (WILLIAMS, 2004). Esta tese visa minimizar este problema através da criação de um modelo de sistema capaz de aumentar a segurança aérea deste tipo de aeronave.

Aplicações civis e militares demandam cada vez mais o uso de VANTs, mas sua falta de confiabilidade e os riscos de operação resultantes têm provocado uma lenta regulamentação pelas autoridades aeronáuticas. Para uma integração de VANTs no espaço aéreo, eles devem, de alguma forma, atender às regras impostas às aeronaves tripuladas. Não é razoável esperar que regras específicas sejam criadas para este tipo de aviação devido às suas dificuldades para atender às vigentes e, ao mesmo tempo, tenham taxas de acidentes maiores que a aceitável para os tipos atuais. Quando a sua probabilidade de falha catastrófica for menor ou igual às atualmente aceitas para a aviação geral, por exemplo, os VANTs terão seu acesso ao espaço aéreo cedido. A metodologia de projeto e a falta do piloto fazem com que as aeronaves sem piloto tenham os índices observados nos primeiros anos da aeronáutica mundial.

Ao contrário dos aviões com pilotos a bordo, os VANTs carecem de uma boa percepção do ambiente interno e externo e do atendimento de regras estabelecidas de aeronavegabilidade. Humanos embarcados têm a sua disposição cinco sentidos que complementam os dados fornecidos pelos sensores e atuam diretamente no controle do avião. Os VANTs devem esperar as decisões vindas do operador em uma estação de controle, normalmente no solo e distante, e com os dados visuais oferecidos por um monitor e, em alguns casos, de algumas medidas de instrumentos.

Além da perda da percepção sensorial, a falta de humanos a bordo levou os projetistas e fabricantes a relaxarem os rigores impostos às tripuladas, devido à maior facilidade e menores custos. Os VANTs de maior porte, tendo sido desenhados para voar em altitudes e de forma semelhantes aos tripulados, acabam sendo projetados e construídos com as regras estabelecidas pelas autoridades aeronáuticas. Os pequenos, por outro lado, podendo voar em áreas segregadas e desabitadas, tendem a usar partes e subsistemas sem certificação aeronáutica e sem testes que possam comprovar que atendem aos níveis de segurança aceitos pelas regras aeronáuticas de certificação. Apesar destas diferenças, VANTs grandes e pequenos partem de conceitos e designs criados inicialmente para aquelas com um humano a bordo e acabam trazendo conceitos de operação pouco aplicáveis na nova situação (piloto em solo, por exemplo).

Um piloto em uma estação de controle não tem todos os elementos que teria se estivesse de fato voando e a suas decisões podem ser erradas ou chegarem tarde demais ao VANT. Muito é perdido em termos de percepção quando o piloto sai de dentro da aeronave.

E o que fazer se não houver enlace rádio entre a estação de controle e o VANT e este estiver em rota de colisão com outro avião ou se houver um problema em algum de seus subsistemas críticos? Para atender estes exemplos de problemas e tornar o VANT confiável o suficiente (significa tanto quanto um avião tripulado de pequeno porte), é necessário adicionarmos um sistema capaz de incrementar a sua velocidade na identificação de eventos que possam resultar em acidentes e tomar as decisões de forma rápida, eficaz e eficiente. Isto, obviamente, envolve um sistema com informações adicionais e com maior capacidade de tomada de decisões em relação aos VANTs atuais.

Com estas questões em foco, esta proposta fornece um modelo que visa aumentar a segurança de voo de Veículos Aéreos Não Tripulados, tendo que esta é uma condição necessária para a sua aceitação e uso comercial, (NATO, 2009) e (FAA, 2012). Este trabalho propõe um conceito inovador, chamado de *In-Flight Awareness* (IFA), que estabelece um modelo para a obtenção de consciência situacional em aeronaves não tripuladas, não do

operador ou do comandante de uma operação, mas da plataforma, dando-lhe maior autonomia.

Intensas pesquisas têm sido voltadas ao incremento da consciência situacional de operadores, tornando-os mais capazes de tomar decisões corretas e mais rápidas, mas pouco foi feito para tornar as aeronaves mais autônomas. Esta tese visa contribuir neste sentido.

A partir de eventos ocorridos interna ou externamente à aeronave, o sistema proposto verifica os sintomas (através dos dados dos sensores embarcados, ambientais e de tráfego aéreo) e toma decisões levando em consideração as capacidades da aeronave. As origens dos eventos são identificadas para evitar ou mitigar acidentes, mediante um algoritmo de análise e decisão. Tendo em conta que a segurança é o fator mais importante para assegurar a integração dos VANTs no espaço aéreo, é preciso criar formas de trazer novamente a bordo o que foi eventualmente perdido com a saída dos pilotos (MATTEI, FONSECA, *et al.*, 2013), (MATTEI, CUNHA, *et al.*, 2015) e (FIGUEIRA, TRINDADE, *et al.*, 2013). O objetivo da abordagem é maximizar a segurança da plataforma aérea através da detecção de falhas, do diagnóstico, da capacidade de auto-recuperação e do replanejamento de rotas, considerando obstáculos, riscos e recompensas envolvidos no processo decisório.

Este capítulo apresentará alguns poucos temas iniciais, somente aqueles julgados essenciais à compreensão do desenvolvimento da tese. Será visto, inicialmente, como a autoridade aeronáutica define os VANTs, em seguida, feita uma revisão rápida do seu desenvolvimento histórico e suas aplicações civis e militares para, finalmente, apresentarmos a motivação e os seus objetivos gerais e específicos.

1.1 Definição de VANT

Inicialmente, define-se VANT e SisVANT usando como base a legislação vigente no país (ANAC, 2012).

A ANAC, Agência Nacional de Aviação Civil, define VANT como sendo “*Aeronave projetada para operar sem piloto a bordo e que não seja utilizada para fins meramente recreativos*”. Também define o acrônimo RPA: “*Aeronave Pilotada Remotamente (Remotely-Piloted Aircraft): Aeronave em que o piloto não está a bordo. É uma subcategoria de Veículos Aéreos Não Tripulados*”.

O acréscimo do termo “Sistema” se destina a adicionar os elementos necessários na operação, além da plataforma aérea em si. A ANAC define SISVANT (Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado) como sendo: “*Aeronave e componentes associados destinados à operação sem piloto a bordo*” e Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft System, RPAS*) como:

“Conjunto de elementos abrangendo uma aeronave pilotada remotamente, a estação de pilotagem remota correspondente, os enlaces de comando e controle requeridos e quaisquer outros elementos que podem ser necessários a qualquer momento durante a operação”. (ANAC, 2012).

Para os propósitos deste trabalho, serão utilizados os termos VANT e SisVANT. A definição do primeiro termo traz os elementos necessários ao desenvolvimento das ideias deste trabalho. A definição do segundo termo agrega os componentes adicionais mandatórios ao voo da plataforma autônoma como, por exemplo, a estação de terra e o enlace de controle e de dados da carga útil. Nota-se, no entanto, que falta, nas definições da ANAC, a inclusão de uma expressão que informe que um VANT deve ter capacidade de voo por seus próprios meios (voo autônomo), mesmo tendo um piloto disponível e com capacidade de interferir.

1.2 Breve Histórico

Ouvir as palavras robótica, eletrônica e computação embarcada, traz, de imediato, imagens de modernidade às mentes. Nada mais futurístico do que pensar em aplicar aeronaves sem piloto em combate penetrando com manobras agressivas em território inimigo ou em pensar na realização automática e contínua de imageamento de áreas selvagens e fazendas, protegendo a fauna e flora e aumentando a produtividade e a disponibilidade de alimentos. No entanto, é interessante verificar como foram os primórdios das aeronaves autônomas e seu caminho até a modernidade.

Devido ao ambiente de alto risco a que ficam submetidos os pilotos em combate, os militares foram pioneiros na automação de aeronaves e alguns visionários perceberam rapidamente a sua importância futura. Já em 1956, o Maj. Gen. David Baker, Força Aérea dos EUA registrou a seguinte frase: *“We can readily see that except for certain types of missions, the manned combat aircraft will become technically obsolete in the future”* (“Podemos ver facilmente que, exceto para certos tipos de missões, a aeronave de combate tripulada se tornará tecnicamente obsoleta no futuro”), (BAKER, 1956) apud (THE MITCHELL INSTITUTE FOR AIRPOWER STUDIES, 2010)). Apesar das aparências, o Gen Baker se referia a mísseis balísticos e não a aeronaves sem piloto (como ele poderia imaginar um cenário tecnológico como o atual?), mas, de qualquer forma, pode-se encarar estes mísseis como veículos autônomos (possuem sensores, navegação própria e destino), diferenciando-se no tipo e característica da plataforma aérea e missão. No entanto, diversos esforços anteriores aos da data da frase já haviam surpreendentemente sido feitos. A tecnologia é moderna, a ideia não.

a)

b)

Figura 1-1 – a) Curtiss N-9 usado em 1917 em testes preliminares como VANT bombardeiro, (AIRCRAFT-ENCYCLOPEDIA, 2013); b) VANT OQ-2, usado como alvo aéreo, da empresa americana Radioplane Corporation, 1935, (KATZ, KENNETH P., AND KATZ AEROSYSTEMS, 2013).

Figura 1-2 – Míssil de cruzeiro ou VANT? V1 alemã, usada no final da II Grande Guerra contra o Reino Unido, (THE BATTLEFIELD SITE, 2013).

Uma rápida verificação dos esforços ao longo da história permite perceber que o uso de VANTs surgiu praticamente junto com os primeiros voos dos pioneiros da aviação. Em 1917, Dr. Peter Cooper e Elmer A. Sperry inventaram o giroscópio para ajudar na estabilização da aeronave e o fizeram voar no treinador Curtiss N-9 da Marinha dos EUA, conforme Figura 1-1a, (CAI, LUM, *et al.*, 2010) (NOMAMI, 2007) (JONES, 1997). O Curtiss N-9 foi o primeiro VANT da história e realizou voos de testes para ser usado como

bombardeiro, no entanto, nunca chegou a ser empregado operacionalmente devido à imaturidade tecnológica do início do século XX. Na Figura 1-1b, tem-se a aeronave remotamente pilotada OQ-2, da Força Aérea Americana. O VANT OQ-2 foi fabricado aos milhares com outros alvos aéreos (OQ-3 e OQ-4) pela empresa Radioplane Corporation, criada em 1935 pelo veterano inglês da I GGM e empreendedor Reginald L. Denny, (KATZ, KENNETH P., AND KATZ AEROSYSTEMS, 2013) (JONES, 1997). Um outro exemplo de sistema autônomo é a Vergeltungswaffe-1 (V1), (CAI, LUM, *et al.*, 2010), fantástico feito de engenharia de 1944, pode ser verificado na Figura 1-2. Em termos conceituais, a V1 se diferencia dos VANTs atuais pela falta do contato com uma estação de terra. Sua navegação estava baseada em uma unidade giroscópica, uma bússola magnética e uma ventoinha no nariz, destinada a medir a distância percorrida a partir dos giros em seu eixo. Assim que um certo número predeterminado de giros se completava, a aeronave mergulhava para se chocar com o solo e detonar a sua carga explosiva.

A partir da década de 50, diversos outros exemplos poderiam ser citados, mas cabe menção à família de VANTs produzidos pela empresa Teledyne Ryan. Os modelos produzidos pela Teledyne Ryan eram bastante sofisticados, veja Figura 1-3, alguns com capacidade de voo a 65 mil pés de altura e capacidade de interferência nos mísseis terra-ar soviéticos SA-2, (THE MITCHELL INSTITUTE FOR AIRPOWER STUDIES, 2010). Outros exemplos preenchem o espaço temporal entre a Segunda Grande Guerra Mundial e a década de 60, quando a comunidade de inteligência dos EUA começou a financiar projetos na área de forma decisiva, (THE MITCHELL INSTITUTE FOR AIRPOWER STUDIES, 2010). No entanto, somente os avanços na eletrônica e na computação a partir da década de 90 tornaram os VANTs uma realidade operacional e permitiu o seu uso amplo na comunidade civil.

Figura 1-3 – Um VANT Teledyne Ryan Model 147 (USAF AQM-34) sendo lançado a partir de uma aeronave DC-130.

Os avanços tecnológicos dos últimos vinte anos fizeram avançar rapidamente o emprego dos VANTs. O mundo pôde assistir ao uso de VANTs em combate pela primeira vez de forma disseminada durante a Guerra do Golfo, em 1991, e o seu desenvolvimento após este batismo. Uma aeronave de emprego tático utilizada durante este confronto foi o *Pioneer*, com desenvolvimento inicial feito por Israel e continuado pela Marinha dos EUA a partir de 1985, (JONES, 1997). No entanto, foi o sucesso no emprego do VANT fabricado pela empresa americana General Atomics, *Predator*, no conflito da Iugoslávia (década de 90), que definiu a sua disseminação, veja Figura 1-4, (GENERAL ATOMICS, 2013).

Na área civil, cabe citar o desenvolvimento do projeto ERAST (*Environmental Research Aircrafts and Sensor Technology*) pela NASA, (NOMAMI, 2007). Este projeto visava um VANT para voos de alta altitude (até 90 mil pés) para emprego em monitoramento do meio ambiente e forneceu elementos diversos em termos de subsistemas e carga útil, particularmente a necessidade de sua miniaturização (WATTS, AMBROSIA e HINKLEY, 2012). A NASA inspirou uma série de desenvolvimentos de aplicações civis, mas as

aeronaves ainda estavam baseadas no controle remoto devido aos elevados custos de um similar aos usados pelos militares, (NYQUIST, 1997).

Figura 1-4 – VANT Predator. (GENERAL ATOMICS, 2013)

Através deste breve retrospecto histórico, pode-se identificar e entender algumas das necessidades, esforços e linhas de desenvolvimento atuais. A motivação primordial para os VANTs foi seu uso naqueles ambientes de alto risco aos humanos e, a partir daí, tornar os sistemas embarcados pequenos, leves, confiáveis e de menor custo. Atualmente, a grande mudança neste paradigma não está na plataforma e na sua estação de terra, mas na adequação do emprego de aeronaves sem pilotos aos níveis de segurança encontrados na aviação controlada por pilotos embarcados.

Outra questão que a revisão histórica suscita se refere às aplicações destinadas a estas aeronaves autônomas. Buscaremos, no próximo item, um melhor entendimento sobre os ambientes e missões em que os VANTs estão inseridos atualmente.

1.3 Aplicações Militares e Civis

Como visto no item anterior, surpreendentemente, os VANTs nasceram quase que simultaneamente à aviação tripulada. Contudo, a falta de pessoas embarcadas e de algumas tecnologias chave impediram seu amplo uso até que as ciências ligadas à automação de sistemas avançassem o suficiente. Os avanços significativos em eletrônica e computação da década de 90 permitiram a ampla disseminação deste tipo de aeronaves em missões civis e militares. Neste item, verificaremos quais são as aplicações atuais e como são os ambientes em que encontramos VANTs realizando missões.

Neste trabalho, opta-se por realizar uma taxonomia das missões realizadas por VANTs tendo como base as definições estabelecidas pelo Comando da Aeronáutica (BRASIL, 2012) e no formato adotado por (NEHME, CUMMINGS e CRANDALL, 2006), conforme a Tabela 1-1 e Tabela 1-2, respectivamente.

A Tabela 1-1 apresenta as missões de Força Aérea conforme preconizado pelo Comando da Aeronáutica e não é específica de VANTs. Estas devem atender em maior ou menor grau a estas atividades e devem ser desenvolvidas conforme as suas exigências e requisitos. De forma geral, as aeronaves autônomas são capazes de realizar todas as missões identificadas, algumas com maior dificuldade com a tecnologia atual, como a de Transporte Aéreo Logístico (TAL).

A Tabela 1-2 apresenta os estudos realizados por (NEHME, CUMMINGS e CRANDALL, 2006), mas ao mesmo tempo adapta os termos e conceitos àqueles do Comando da Aeronáutica expostos na Tabela 1-1. Em alguns casos, missões semelhantes acabam recebendo denominações diferentes, o que poderia tornar mais confuso o entendimento. Esta tabela traz aquelas missões que podem ser realizadas por VANTs no cenário tecnológico e operacional atuais.

A ampla gama de missões apresentadas é conhecida e o aumento do número de VANTs em uso tem causado preocupações quanto às falhas diversas que uma operação pode

apresentar. Na próxima seção, buscaremos um melhor entendimento sobre situações emergências.

Tabela 1-1 – Algumas ações de Força Aérea, conforme preconizado pelo Comando da Aeronáutica. **(BRASIL, 2012)**

Ações de Força Aérea	Definição
Ataque	Ataque (Atq) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para neutralizar ou destruir alvos inimigos, previamente localizados e identificados.
Antissubmarino	Antissubmarino (AS) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para detectar, identificar e neutralizar ou destruir submarinos inimigos em áreas marítimas de interesse.
Apoio Aéreo Aproximado	Apoio Aéreo Aproximado (Ap AA) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para detectar, identificar e neutralizar ou destruir forças de superfície inimigas que estejam em contato direto com forças de superfície amigas.
Autodefesa de Superfície	Autodefesa de Superfície (ADS) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para detectar, identificar e neutralizar ou impedir ataques realizados por forças terrestres, aeroterrestres, aeromóveis ou anfíbias inimigas.
Busca e Salvamento	Busca e Salvamento (SAR) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para localizar e salvar pessoas em perigo na terra ou no mar.
Busca e Salvamento em Combate	Busca e Salvamento em Combate (CSAR) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para localizar e salvar militares em território hostil, especialmente tripulantes abatidos ou acidentados, ou pessoal militar isolado em perigo.
Controle Aéreo Avançado	Controle Aéreo Avançado (CAA) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para coordenar, a partir do ar, o ataque de aeronaves contra alvos inimigos.
Controle e Alarme em Voo	Controle e Alarme em Voo (CAV) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para controlar aeronaves amigas e para detectar, identificar e dar alarme antecipado de incursões aéreas inimigas.
Defesa Aérea	Defesa Aérea (DA) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para detectar, identificar e neutralizar ou destruir vetores aéreos inimigos que ameacem forças amigas e áreas de interesse.
Inteligência Operacional	Inteligência Operacional (Intlg Op) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para produzir conhecimento sobre o oponente e para salvaguardar o conhecimento sensível das forças amigas.
Interferência Eletrônica	Interferência Eletrônica (Interf Elt) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para reduzir ou impedir o uso do espectro eletromagnético pelo inimigo.
Minagem Aérea	Minagem Aérea (Min Ae) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para impedir ou limitar o movimento de navios e submarinos inimigos em áreas de interesse.
Patrulha Marítima	Patrulha Marítima (PATMAR) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para detectar, identificar e neutralizar ou destruir navios inimigos em áreas marítimas de interesse das operações navais.
Posto de Comunicação no Ar	Posto de Comunicação no Ar (P Com-Ar) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea, no ar, para assegurar o fluxo de informações entre forças amigas no TO.
Reconhecimento Aéreo	Reconhecimento Aéreo (Rec Ae) é a Ação que consiste em empregar Meios de Força Aérea para coletar dados específicos sobre forças inimigas e áreas de interesse.

Missão		Definição
Entrega de Carga Útil	Proteção Eletrônica	Entrega de carga útil em um destino específico. Nas Forças Armadas, inserções normalmente envolvem armas (não necessariamente letais) e podem incluir tornar de instalações inoperáveis (interferência eletrônica), e eliminação de alvos. As aplicações comerciais incluem pulverização das culturas.
	Letal	
Comunicação	Posto de Comunicação no Ar	Enlaces entre as unidades, incluindo aqueles entre plataformas, entidades de nível superior ou relay entre estações de terra e espaço.
	Escuta	
Vigilância	Sensoriamento Nuclear, Biológico e Químico	Processo de monitorar o comportamento das pessoas, objetos, áreas ou processos de conformidade com as normas esperados ou desejados.
	Vigilância Geoespacial	
	Alvo Estático	
	Alvo Dinâmico	

1.4 Motivação

1.4.1. PREPARO PARA SITUAÇÕES EMERGENCIAIS EM VOO

Segundo a definição da ANAC, o piloto em comando é

“...membro da tripulação habilitado sem restrições para a aeronave e a operação a ser conduzida, sendo responsável pela segurança da operação, da aeronave e das pessoas a bordo.” (ANAC, 2010).

As aeronaves são projetadas e construídas para executar tarefas específicas com segurança e eficiência. Dependendo do tipo de missão e ambiente, as exigências à máquina e aos tripulantes podem mudar significativamente. A Figura 1-5 mostra o *cockpit* de uma aeronave civil e uma militar em que algumas das diferentes circunstâncias ficam evidenciadas de forma clara e direta.

Existem diferenças marcantes, mas também similaridades, entre aeronaves civis e militares. O piloto civil pode estar responsável por aeronaves maiores e com passageiros,

necessitando de aeronaves mais estáveis do ponto de vista aerodinâmico e com maior espaço para apresentação de dados. O piloto militar pode ficar submetido a ambientes limitados em espaço para ele e para os dados e, ao mesmo tempo, ter que gerenciar situações de forma rápida. Apesar das diferenças, em ambas as situações, as aeronaves foram desenhadas para uma certa situação específica, que significa um certo perfil de velocidades, altitude, capacidade e experiência dos pilotos, aviônicos para gerenciamento da aeronave e comunicação externa. Segundo (ABBOTT, 1993), a tripulação executa as suas tarefas através do gerenciamento de voo (navegação e pilotagem), de comunicações (controle de tráfego e interno), de sistemas embarcados (sistemas da aeronave) e de tarefas (uso dos recursos para cumprimento da missão e objetivos do voo).

Retornando à definição da ANAC do início deste item, vê-se que o piloto deve estar habilitado para conduzir a aeronave VANT de forma segura. Contudo, definindo situação normal de voo como aquela em que a aeronave opera nas condições internas e externas para as quais foi projetada e para as quais os pilotos foram treinados, o que acontece se houver uma situação fora da normalidade, adversa àquela para a qual é necessária uma ação corretiva ou mitigadora para manutenção da segurança? E se, nesta situação inesperada, os responsáveis pelas ações estiverem privados de parte de seus sistemas sensoriais?

Figura 1-5– Pilotos são treinados para operar aeronaves com diferentes desempenhos de forma segura em diferentes situações de voo. (AVIATION TROUBLESHOOTING, 2010), (CECOMSAER, 2013)

Uma situação adversa traz riscos à operação da aeronave, pois pode conduzi-la a um estado em que não possa ser controlada ou para a qual os pilotos ou controle de tráfego não estejam bem treinados. Uma alteração significativa nos sistemas da aeronave sobrecarrega os pilotos para o entendimento da situação corrente e suas consequências e pode exigir medidas adicionais. Um problema mecânico ou eletrônico ou condições meteorológicas adversas podem exigir alteração na forma de pilotagem (comandos de voo não respondem como deveriam), aumento nas comunicações (internas e com controle de tráfego), alteração de perfil de voo (rota e altitude) e medidas de mitigação através de alteração na operação dos sistemas da aeronave.

Obviamente, pilotos e controladores de voo estão preparados para lidar com uma série de situações fora do que pode ser considerado ideal ou normal. Tempestades, ventos fortes, gelo em altitude e falha nas comunicações e em sistemas da aeronave são, por exemplo, condições que ocorrem com certa frequência e, conseqüentemente, os operadores de solo e em voo devem estar treinados em sua gerência. Um piloto deve saber o que fazer em caso de falha de um dos motores, alterando sua forma de pilotagem e buscando um lugar seguro para pousar. Um controlador de voo deve saber o que fazer em caso de aproximação de ventos fortes e tempestades, mesmo que isto exija o cancelamento das operações aéreas. Os órgãos reguladores procuram informar os operadores sobre situações de emergência ou potencialmente perigosas como mostra, por exemplo, o capítulo 16 do manual de voo da FAA (FAA, 2004). Apesar de estas condições adversas exigirem medidas adicionais para manter a segurança e o cumprimento das tarefas de voo, sua ocorrência está prevista e a estrutura de solo e aérea estão, ou deveriam estar, preparadas para lidar com elas.

1.4.2. O PAPEL DO PILOTO NA AVIAÇÃO NÃO TRIPULADA

Apesar das diferenças intrínsecas, a tarefa do piloto embarcado e de um VANT não diferem substancialmente. Ambos devem estar atentos aos diversos sistemas da aeronave e sensores para poderem atuar sobre as superfícies de comando e, assim, cumprir a navegação prevista em solo e adaptá-la se situações inusitadas surgirem. Esta visão explica porque os VANTs também são chamados de aeronaves remotamente pilotadas, mas esconde as enormes diferenças entre estar dentro da aeronave ou em uma estação de controle. Conforme citado por Pestana em seu artigo (PESTANA, 2011), piloto da NASA, ao contrário de quando está embarcado, o piloto do VANT não sente nada em seu voo, pois pode apenas observar no monitor o que acontece com a aeronave, usa somente a visão. Ele (ou ela) não possui mais as sensações de inércia, visão lateral e os outros órgãos sensoriais, além da visão, para ajudá-lo nas percepções do voo.

O monitor, ou monitores, disponíveis ao piloto de VANT devem ser capazes de apresentar diversas informações, desde aquelas essenciais e de urgência, como aquelas que poderão eventualmente ser consultadas se uma situação específica exigir. De uma forma ou outra, o piloto de VANT terá um vídeo com a visão frontal da aeronave, como se estivesse a bordo, dados dos sistemas da aeronave (saúde), um mapa com um *icon* da aeronave em sua posição atual e um painel de avisos e cuidados. No entanto, o arranjo de dados e monitores é diferente entre VANTs e as aeronaves tripuladas e o excesso de informações em conjunto com a falta de sensações podem provocar perda de consciência situacional (PESTANA, 2011), o que ajuda a explicar a enorme taxa de acidentes provocada por fatores humanos, erros (WILLIAMS, 2004). Os pilotos acostumados com as aeronaves tradicionais podem ter dificuldades com o controle dos robôs aéreos.

Na Figura 1-6, pode-se verificar a estação de controle usada pela NASA em uma missão de um VANT, (PESTANA, 2011). Nesta estação, o piloto está sentado ao fundo e dispõe de vários monitores e dados diversos à sua disposição. Contudo, os pilotos

embarcados em aeronaves possuem um ângulo de visão muito mais amplo, Figura 1-5, e podem selecionar melhor o que devem ver a cada fase ou situação de voo.

Figura 1-6– Estação de controle de um VANT. O piloto está sentado ao fundo. (PESTANA, 2011).

1.5 Objetivos

1.5.1. ESPECÍFICO

O objetivo específico deste trabalho será criar um modelo de referência para o aumento da consciência situacional em voo (*In-Flight Awareness*) visando melhorar a segurança de voo de VANTs.

Existe atualmente um elevado índice de acidentes com os VANTs em relação aos encontrados em aeronaves tripulados, da aviação geral por exemplo. Uma parte destes índices advém de erros na tomada de decisões por parte dos pilotos e devido à problemas na sua análise de situações surgidas durante o voo. Visando melhorar os índices de segurança de voo dos VANTs, este trabalho propõe um sistema que torna o avião mais consciente e mais capaz de decisões autônomas, chamado IFA (*In-Flight Awareness*).

1.5.2. GERAIS

Os objetivos gerais deste trabalho são a validação dos conceitos em um ambiente de simulação com estudo de caso.

O modelo de referência será aplicado em casos para validar os conceitos criados. Será criado um sistema IFA simulado adaptado às limitações de uma aeronave real. Este sistema deverá ao mesmo tempo aumentar a segurança aérea e respeitar as capacidades da aeronave em termos de interface com seu piloto automático e sistemas embarcados.

1.6 Inovações do Trabalho de Tese

Inovações trazidas com esta tese:

1. Criação de um modelo estruturante para aumento de consciência situacional centrada na plataforma aérea visando melhorar a segurança de voo;
2. Criação de um modelo para análise risco para VANTs;
3. Estabelecimento de definição da arquitetura do sistema IFA²S, através de uma taxonomia de sensores;
4. Uso da metodologia STPA na definição de requisitos de segurança de voo de para aumento da consciência situacional de VANTs;
5. Uso de algoritmos genéticos para o recálculo automático de rota para escolha do local de pouso de emergência.

1.7 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Situação do Problema e Conceitos Fundamentais

Neste capítulo serão apresentados os elementos conceituais essenciais ao desenvolvimento do trabalho. O item 2.1 apresentará os conceitos básicos e arquiteturas típicas de Sistemas de Veículos Aéreos não Tripulados. Após estas informações iniciais, serão verificadas algumas questões relacionadas à sua integração no espaço aéreo (2.2) e o risco operacional envolvido na operação de VANTs (2.3), levando em consideração a regulamentação nacional vigente. O item 2.3 analisará aspectos relacionados a acidentes aéreos da aviação tripulada e não tripulada e a aceitação e avaliação quantitativa dos riscos operacionais. Para finalizar, o item 2.4 trará os conceitos fundamentais sobre consciência situacional, de forma geral e não específica dos VANTs.

- Capítulo 3: Consciência Situacional em Voo - Revisão Sistemática

Nesse capítulo será feita uma revisão sistemática da literatura para verificar as publicações na área. Esta revisão permitirá um entendimento dos estudos em andamento e as tendências atuais, facilitando sobremaneira o posicionamento dos estudos que serão desenvolvidos na tese. Após algumas considerações iniciais (3.1), os itens 2.2 e 2.3 apresentarão, respectivamente, como a revisão bibliográfica foi planejada e conduzida. Quantos e quais as fontes dos trabalhos selecionados serão apresentados neste item. O item 3.4 verificará a utilidade das informações contidas nos trabalhos selecionados para a finalidade desta tese.

- Capítulo 4: *Determinação de Requisitos de Segurança de Voo*

Este capítulo cria os requisitos de alto nível necessários ao aumento de segurança de voo de VANTs por meio da metodologia *System Theoretic Process Analysis*

(STPA). Seguindo esta metodologia, este capítulo identifica os acidentes e perigos na operação de um VANT, define duas malhas de controle para identificar os cenários em que acidentes podem ocorrer devido ao processo de decisão do piloto em solo ou de forma autônoma pela aeronave e, finalmente, os requisitos de alto nível necessários para aumentar a segurança de voo de VANTs.

- Capítulo 5: *Definição dos Conceitos de IFA e de IFA²S*

Este capítulo apresenta os conceitos preliminares sobre IFA e IFA²S, tendo em conta os requisitos estabelecidos e o objetivo de aumento da consciência situacional. As dimensões do IFA e definição do IFA²S são apresentadas de forma sistemática. Finalmente, é apresentada uma proposta de processo de definição do sistema embarcado.

- Capítulo 6: *Simulação do IFA usando o Labview e o XPlane*

Este Capítulo apresenta um ambiente de simulação em que soluções automatizadas são testadas em diferentes situações operacionais. Uma máquina de estados é apresentada e as estratégias usadas nos diversos estados explicadas.

- Capítulo 7: *Resultados da Simulação em Labview*

Este Capítulo faz uso do ambiente de simulação criado e das soluções implementadas na máquina de estados para apresentar os resultados obtidos nas diversas situações operacionais.

- Capítulo 8: *Avaliação Quantitativa do Impacto do IFA²S no Risco Operacional dos VANTs*

Este Capítulo verifica o impacto do IFA²S no risco operacional de VANTs. É realizado um aprofundamento na determinação da taxa de falhas de uma aeronave sem valores determinados de confiabilidade de componentes. Considerando os

requisitos definidos através do STPA, faz-se uso da taxa de falhas para avaliação do impacto operacional com um sistema IFA²S embarcado.

- **Capítulo 9: *Arquitetura para Projeto do IFA²S em Hardware***

Este Capítulo fornece elementos de orientação para implementação do IFA²S em hardware. Mostra-se a arquitetura de integração com o piloto automático e as entradas e saídas necessárias às suas funções. Em seguida, é apresentada uma solução simples implementada com portas lógicas seguida de abordagens mais elaboradas de geração automática de códigos utilizando modelos. Finalmente, mostram-se ferramentas de software aberto que permitem a construção de transceptores para servir ao enlace de dados, necessários à manutenção da consciência situacional.

1.8 Conclusão

Foi visto que as primeiras tentativas para desenvolvimentos de aeronaves capazes de voar sem pilotos surgiram nos primeiros anos da aviação. Apesar de seu nascimento no campo militar, atualmente existe um número amplo de aplicações civis para os VANTs. Contudo, devido às diferenças de percepção entre os pilotos de aeronaves com e sem pilotos, existe uma resistências de autoridades aeronáuticas na aceitação das mesmas no espaço aéreo. O sucesso deste trabalho facilita neste sentido, pois aumenta a segurança de voo associada aos aviões sem piloto a bordo.

Este capítulo apresentou os primeiros conceitos relacionados ao tema de tese e julgados essenciais à compreensão do seu desenvolvimento. Foi feita uma revisão superficial do seu desenvolvimento histórico, verificadas as diversas situações civis e militares em são operados e apresentadas os objetivos gerais e específicos da tese.

2 Revisão da Literatura

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta uma revisão sistemática sobre o estado da arte das pesquisas relacionadas ao tema central deste trabalho. Por consciência situacional de aeronaves ser um conceito inovador, buscou-se na literatura abordagens conceitualmente próximas e aquelas complementares e úteis ao desenvolvimento do trabalho. São abordados os seguintes temas: a) Sistemas de supervisão voltados ao aumento da consciência situacional; b) Sistemas para mitigação de incidentes aeronáuticos; c) Consciência Situacional.

O capítulo está dividido em cinco seções. A Seção 2.2 apresenta o planejamento da revisão sistemática; a Seção 2.3 descreve a forma como a mesma foi conduzida, as buscas nas fontes de pesquisa e os procedimentos de seleção preliminar e final dos trabalhos; a Seção 2.4 apresenta o conteúdo da revisão sistemática e, finalmente, a Seção 2.5 apresenta as considerações finais do capítulo.

2.2 Planejamento da Revisão

Os elementos que compõe a revisão sistemática são: questões de pesquisa, termos-chave, seleção de fontes, linguagem dos trabalhos, lista de fontes, sentenças de busca e critérios de seleção dos trabalhos. Cada um desses elementos será explicitado nas subseções seguintes.

a) Questões de pesquisa

As questões de pesquisa elaboradas com base nos principais conceitos envolvidos neste trabalho são apresentadas a seguir.

1. Como se define Consciência Situacional?

2. Quais são os conceitos preliminares importantes para o entendimento adequado de Consciência Situacional?
3. Existem exemplos que ajudem a guiar o projeto de um sistema IFA, em termos de requisitos técnicos e funcionais?
4. Como se avalia o nível de Consciência Situacional?
5. Quais são as tecnologias que facilitam a implementação de um sistema IFA?

b) Termos chave

A partir das questões elaboradas no item “a” foram selecionados os seguintes termos chave para pesquisa nas línguas portuguesa e inglesa:

1. Consciência situacional (*Situation Awareness*);
2. Veículos Aéreos Não Tripulados - VANTs (*Unmanned Aerial Vehicle - UAV*);
3. Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas - SisVANTs (*Unmanned Aerial System - UAS*).

c) Linguagem do estudo

Foi selecionado o idioma inglês para as buscas nas fontes em função da ampla disponibilidade de artigos relacionados às áreas de ciência e tecnologia.

d) Lista de fontes

Foram selecionadas para o estudo primário fontes que possuem como característica principal ampla utilização e indexação, bem como um acervo vasto disponível para consulta nas áreas de pesquisas relacionadas com computação e tecnologia. Os seguintes portais de pesquisa foram considerados:

- Compendex (<http://www.ei.org/compendex>);

- Inspec (<http://www.theiet.org/resources/inspec/>);
- The American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA (<http://arc.aiaa.org/>);
- NTIS (<http://www.ntis.gov/>); e
- Google Scholar.

f) Sentenças de busca

A partir das considerações anteriormente apresentadas, foram selecionadas sentenças de busca preliminares e restritivas. A seleção dessas sentenças foi feita avaliando-se de forma interativa os resultados da pesquisa em relação à qualidade e a pertinência. As sentenças de busca foram definidas apenas na língua inglesa, pois trabalhos em português costumam apresentar seções de resumos e palavras chave na língua inglesa.

- Sentenças preliminares: foram elaboradas com o objetivo de obter o maior volume possível de trabalhos relacionados aos principais termos-chave:
 - a. *"Situation Awareness"*;
 - b. *"Supervisory System"*;
 - c. *"Unmanned Aerial Vehicle"*;
 - d. *"Autonomous Flying Robots"*.
- Sentenças restritivas: foram elaboradas a partir das sentenças preliminares com o objetivo de realizar um maior direcionamento dos resultados para os temas em questão:
 - 1) ((*"Situation Awareness"*) <and> (*"Unmanned Aerial Vehicle"*));
 - 2) ((*"Situation Awareness"*) <and> (*"Autonomous Flying Robots"*));
 - 3) ((*"Supervisory System"*) <and> (*"Unmanned Aerial Vehicle"*));
 - 4) ((*"Supervisory System"*) <and> (*"Autonomous Flying Robots"*));

Os operadores utilizados na composição das sentenças de busca possuem as seguintes funcionalidades:

- AND: o conectivo aditivo ‘E’ procura registros que atendem às duas condições simultaneamente;
- Parênteses (...): utilizados para que todos os termos ligados pelos conectivos apareçam no mesmo trabalho;
- Aspas “...”: utilizadas para pesquisar a ocorrência de uma palavra ou de um conjunto de palavras na forma especificada.

g) Critérios de seleção de trabalhos

Critérios de Inclusão

- CI-1: Trabalhos que abordem o conceito de consciência situacional;
- CI-2: Trabalhos que abordem a aplicação de sistemas para incremento de consciência situacional na operação de VANTs;
- CI-3: Trabalhos que abordem a aplicação de sistemas supervisores na operação de VANTs;
- CI-3: Trabalhos relacionados à utilização de tecnologias que facilitem a tomada de consciência situacional por VANTs.

Critérios de Exclusão

- CE-1: Trabalhos relacionados a sistemas embarcados que não se referem a técnicas e conceitos e aplicações de consciência situacional em VANTs;
- CE-2: Trabalhos relacionados a sistemas embarcados que não se referem a técnicas e conceitos e aplicações de sistemas supervisores em VANTs;
- CE-3: Trabalhos que tratam de uma aplicação específica fora do interesse específico de IFA.

2.3 Condução da Revisão

Esse capítulo apresenta uma revisão sistemática sobre os temas deste trabalho realizada entre os meses de março 2013 e janeiro 2014.

a) Seleção preliminar

Após a criação das sentenças de busca (preliminares e restritivas) com base nos termos de pesquisa, as mesmas foram inseridas nas bases de dados indexadas para o processo de revisão, sendo adaptadas de acordo com a linguagem de cada fonte. O operador lógico AND foi utilizado na construção das sentenças de busca de forma relacionar os principais termos chave.

Foram encontrados um total de 114.439 trabalhos, cujos atributos principais são: local e ano de publicação, título e lista de autores. A Tabela 2-1 apresenta a quantidade de trabalhos retornados das bases de dados utilizadas através das sentenças iniciais de busca, chamados de trabalhos preliminares.

Tabela 2-1. Trabalhos preliminares.

Bases de dados x Sentenças iniciais de busca	Compendex	Inspec	AIAA	NTIS	Google Scholar
<i>"Situation Awareness"</i>	10823	7582	647	3458	45000
<i>"Supervisory System"</i>	12949	12521	21	1338	20100
Número total de trabalhos	23772	20103	668	4796	65100
Porcentagem (%)	21%	18%	1%	4%	57%

Dos 114.439 trabalhos, obtidos através das sentenças de busca mais abrangentes, foi realizado um refinamento através de sentenças mais restritivas e direcionadas ao tema em questão. A Tabela 2-2 a seguir apresenta o número de trabalhos pré-selecionados por fonte.

Tabela 2-2. Trabalhos pré-selecionados.

Bases de dados x Sentenças de busca restritivas	Compendex	Inspec	AIAA	NTIS	Google Scholar
“Situation Awareness” and “Unmanned Aerial Vehicle”	234	129	47	99	1610
“Situation Awareness” and “Autonomous Flying Robots”	13	7	5	5	5
“Supervisory System” and “Unmanned Aerial Vehicle”	68	31	0	18	32
“Supervisory System” and “Autonomous Flying Robots”	2	1	0	0	0
Número de trabalhos pré-selecionados	317	168	52	122	1647
Porcentagem (%)	14%	7%	2%	5%	71%

Devido ao grande número de trabalhos resultantes na pré-seleção (2306), para facilitar uma leitura mais objetiva, foram excluídos imediatamente aqueles cujos títulos evidenciaram uma aplicação específica, fora do interesse de IFA (um dos critérios de exclusão) e aqueles tecnológica e conceitualmente ultrapassados. Os trabalhos selecionados foram os que atenderam a algum dos critérios de inclusão e que não foram descartados pelos critérios de exclusão foram estudados e analisados. No que se refere ao conceito de consciência situacional, alguns trabalhos foram considerados mesmo estando incluídos no critério de exclusão com a finalidade de estabelecimento do conceito de IFA. Os trabalhos repetidos em uma ou mais bases de dados foram considerados apenas em sua primeira ocorrência, sendo que a busca nas bases foi realizada sempre da fonte de menor ocorrência para a maior.

b) Seleção final

A Tabela 2-3 e a Figura 2-1 apresentam a distribuição dos 96 trabalhos considerados na seleção final. Quando a mesma referência foi encontrada repetida na Compendex, Inspec, AIAA e NTIS, ela era mantida na primeira base (Compendex) e desconsiderada nas outras. Google Scholar foi usado de forma isolada e anteriormente à busca nas outras bases, assim, os resultados encontrados nesta base, eliminaram os repetidos nas outras.

Tabela 2-3. Trabalhos selecionados por fonte.

Bases de dados x Sentenças de busca restritivas	Compendex	Inspec	AIAA	NTIS	Google Scholar
“Situation Awareness” and “Unmanned Aerial Vehicle”	23	18	1	4	30
“Situation Awareness” and “Autonomous Flying Robots”	2	0	0	0	2
“Supervisory System” and “Unmanned Aerial Vehicle”	5	1	0	1	11
“Supervisory System” and “Autonomous Flying Robots”	0	0	0	0	0
Número de trabalhos pré-selecionados	30	19	1	5	43
Porcentagem (%)	31%	19%	1%	5%	44%

Figura 2-1– Distribuição por fonte dos trabalhos considerados na seleção final.

2.4 Resultados da Revisão Sistemática

Tendo em conta a multiplicidade de possíveis entendimentos sobre o que é consciência situacional e como ela se aplica no caso específico de VANTs, a revisão da literatura foi dividida em temas para facilitar o entendimento e identificação de similaridades e de diferenças, de ideias úteis a esta tese e de possíveis trabalhos futuros. Neste sentido, para

facilitar a compreensão e aproveitamento da literatura, a revisão foi dividida nos seguintes tópicos:

- a. Definição de Consciência Situacional. Este item visa identificar uma definição apropriada de Consciência Situacional em Voo (IFA);
- b. Conceitos Preliminares. Este item visa entender de forma apropriada o conceito de Consciência Situacional aplicado à operação de VANTs;
- c. Revisão de Projetos. Este item visa verificar exemplos de projetos relacionados à Consciência Situacional na operação de VANTs;
- d. Avaliação. Este item visa identificar formas de avaliação da qualidade de Consciência Situacional obtida nos projetos; e
- e. Tecnologias Facilitadoras. Este item visa identificar tecnologias que facilitem o aumento de Consciência Situacional:
 - i. Integração;
 - ii. Comunicação em Rede;
 - iii. Localização e Posicionamento;
 - iv. Determinação de Rotas; e
 - v. Hardware e Software.

Por ser um tema amplo e aplicável em diferentes contextos, inicia-se com o item “Definição de Consciência Situacional” a revisão buscando conceitos que ajudem o autor deste trabalho na definição do que é exatamente consciência situacional em voo (IFA).

Tendo estabelecido a definição e o entendimento mais básico do novo conceito criado, o item “Conceitos Preliminares” vai um pouco além e se aprofunda nos conceitos envolvidos em IFA.

Tendo em mãos definições e conceitos, é feita uma revisão dos diversos projetos que envolvem consciência situacional para VANTs. Importante ressaltar que alguns projetos revistos estão mais próximos do que entendemos de interesse para o IFA e outros mais

distantes, no entanto, este não foi um critério de eliminação para evitar a perda de entendimentos eventualmente úteis.

Os projetos voltados ao aumento de consciência situacional são em muitos casos de difícil mensuração e avaliação. Outro fator relevante é a presença humana no *loop* de controle do VANT, o que torna necessário a estimativa do grau de consciência situacional em alguns trabalhos. Assim, no item “Avaliação” são revistas metodologias de identificação e mensuração de consciência situacional em casos específicos.

Tendo sido realizada uma revisão de definições, conceitos, projetos diversos e mensuração de consciência situacional, o último item, “Tecnologias Facilitadoras”, apresenta diversas tecnologias que foram ou que poderiam ser incorporadas para incremento do tema central. Soluções diversas de hardware e de software são revistas neste item com o objetivo de identificar possíveis implementação de sistemas IFA.

2.4.1. DEFINIÇÃO DE CONSCIÊNCIA SITUACIONAL

A proposta deste trabalho difere da literatura, como veremos nos parágrafos seguintes, devido ao foco e na definição adotada. Ela é diferente porque aplica consciência situacional (CS) centrada na plataforma, mas se adapta à definição fornecida pelo trabalho germinal de Endsley (ENDSLEY, 1988) para expressar o conceito IFA de forma apropriada: “a percepção de elementos no ambiente dentro de um volume de tempo e de espaço, a compreensão de seu significado e a projeção de seu status no futuro próximo”.

Drury et al. (DRURY, RIEK e RACKLIFFE, 2006) usa a definição de Endsley (ENDSLEY, 1988), mas a alterou de forma a tornar mais fácil o reconhecimento da presença de grupos de pessoas e de VANTs durante uma operação. Neste projeto, não só a relação homem-avião é estudada, mas também muitas outras combinações possíveis como VANT-VANT, por exemplo. O trabalho de Drury et al. (DRURY, RIEK e RACKLIFFE, 2006) também analisou alguns dos fatores que afetam um voo e, consequentemente, eletivos a

serem considerados como insumo para o IFA. Elementos tais como o estado dos sistemas da aeronave, condições climáticas, estado da carga útil e o conhecimento do operador sobre as capacidades da plataforma e os aspectos dinâmicos envolvidos foram mencionados para serem considerados durante a decomposição do problema. Embora esta visão ampla fornecida por Drury et al. (DRURY, RIEK e RACKLIFFE, 2006) permita melhorar o conceito do IFA em relação aos trabalhos de Endsley (ENDSLEY, 1988) e (ENDSLEY, 1995), considerando o objetivo deste projeto, deve-se destacar que o elemento central é a percepção do operador sobre a situação atual. Essa percepção é fundamental para que a aeronave possa cumprir sua missão, sem a necessidade de aumentar as capacidades autônomas do VANT.

Em um trabalho posterior, Endsley et al. (ENDSLEY, BOLTE e JONES, 2003) apresentou outra definição para CS: “entendimento compartilhado do subconjunto de informações necessário para cada um de seus objetivos.” Seppänen et al. (SEPPÄNEN, MÄKELÄ, *et al.*, 2013) usou esta definição para CS sob a ótica da gestão de desastres, onde se pode encontrar uma situação particular na qual a coordenação, a informação compartilhada e a resposta rápida são figuras-chave para a eficiência. Aqui CS é um conceito importante para o cumprimento da missão e foi desenvolvido para ser utilizado como uma ferramenta para aumentar a consciência da situação dos VANT em ação. Para situações de emergência, a informação necessária e correta deve estar disponível no momento certo e no formato certo, na medida adequada que o operador necessita para desempenhar o seu papel.

Um exemplo de alternativa ao entendimento da CS pode ser encontrado nos trabalhos de Pedai e Astrov, (ASTROV e PEDAI, 2010) e (ASTROV e PEDAI, 2011). Eles fazem uso da definição de Endsley (ENDSLEY, 1988), e a aplicam como modelagem de controle de voo na simulação de pequenos drones tri e quadrotores. Ambos os documentos não consideram outros aspectos internos e externos. O IFA proposto neste projeto difere desta abordagem, uma vez que considera que controle de voo é uma tarefa atribuída ao piloto automático da aeronave, não ao seu sistema de supervisão.

Ramachandran et al. (RAMACHANDRAN, HONG, *et al.*, 2012) definiu CS com base na disponibilidade de aplicações baseadas em sensores confiáveis e de grande escala. Este trabalho entende que, para alcançar CS, é obrigatório monitorar e inspecionar os arredores da aeronave. Ramachandran et al. (RAMACHANDRAN, HONG, *et al.*, 2012) enfatiza dificuldades em ter uma rede desse tipo em grande escala, não só devido ao custo global, mas também por causa das capacidades de processamento necessárias para lidar com a enorme quantidade de dados. Estas ideias podem ser aplicadas no IFA, mas duas observações devem ser feitas. Primeiro, IFA se preocupa com a plataforma de voo e um grande volume de dados precisará ser avaliado. Deve-se determinar em que medida as informações obtidas são realmente úteis e como o VANT pode ter acesso a elas. Em segundo lugar, este sistema exigirá mais dos sistemas embarcados, não só para processar os dados obtidos, mas também para tornar possível que o VANT os integre com os dados dos seus sensores embarcados.

Fulton et al. (FULTON, BAUMEISTER, *et al.*, 2011) descreve um sistema com tecnologias que permitem melhorar a CS a partir do ponto de vista de *Sense and Avoidance* (S & A). Aqui, aeronaves (sejam tripuladas ou não), fazem uso de um sistema embarcado para compartilhar posição GPS usando enlace de dados inter-plataforma e satélites de comunicação (Iridium). Esse sistema permite que uma aeronave esteja alerta da sua posição em relação às outras e permite um melhor serviço de ATC (Air Traffic Control, Controle de Tráfego Aéreo). Aqui CS é entendida como uma sistemática para tornar o conhecimento da posição de uma aeronave disponível para outras aeronaves e para o ATC.

Machuca et al. (MACHUCA, MILLER e COLOMBI, 2012) usa a definição dada por Endsley (ENDSLEY, 1988) sob o ponto de vista do operador. Seu trabalho percebe que, para se obter CS, operadores devem incluir todos os dados necessários e compreendê-los com base em um contexto, para projetar ações no futuro. Demasiada informação ou carga de trabalho pode diminuir a CS e ser a causa de situações de risco ou de uma missão mal sucedida devido à perda da plataforma (em um acidente ou destruída pelo inimigo em ações militares). VANTs são considerados em voo no modo semi-autônomo (controle dos pilotos

dentro de certos limites, monitorados pelo piloto automático). Nesta situação, os operadores são necessários não só para pilotar a plataforma, mas também para controlar suas cargas úteis e alguns subsistemas.

Connor et al. (CONNOR, GREEN, *et al.*, 2012) se refere a CS como o conhecimento de sinais eletromagnéticos emitidos em um amplo espectro e origens, como áreas urbanas. Embora não tenha ligação direta com CS conforme definido neste artigo, é importante ressaltar que os VANTs podem realizar medições para o mapeamento do espectro se for desejado e possível, considerando as limitações da plataforma (energia, processamento, massa e volume). Levando-se em conta a enorme variedade de sinais e as dificuldades em selecionar um sinal específico e determinar suas características, uma rede construída para facilitar o fluxo de dados pode se encaixar bem neste propósito.

Goossens et al. (GOOSSENS, KOENERS e THEUNISSEN, 2004) reconhece as dificuldades em realizar atualizações de missão em tempo útil e em um ambiente em constante mudança. O foco deste trabalho é analisar melhorias no CS para o operador VANT, disponibilizando não todas, mas apenas as informações necessárias para uma determinada situação e momento. Como foi ressaltado anteriormente, a falta e o excesso de dados diminuem a CS do operador.

Apesar de não abordar o tema de CS diretamente, Pestana (PESTANA, 2011) discute os pontos que foram considerados importantes para o conceito de IFA. O autor discute a falta do piloto a bordo no sentido de que, ao invés dos 5 tipos de sensores diferentes que usava na fusão de dados, no solo passou a usar somente 1, a visão. Pestana discute diversos aspectos relacionados como relevantes ao entendimento do conceito de IFA. A Figura 2-2 mostra um ambiente de controle de operação de um VANT. O piloto do VANT, assim como os operadores de carga útil e de situação, está inserido na operação, mas de forma bastante limitada em relação ao aproveitamento de seus sensores biológicos em relação ao caso de um piloto a bordo. IFA busca preencher esta lacuna sensorial.

Figura 2-2— A imagem à esquerda mostra o piloto da NASA Mark Pestana e tem o objetivo de mostrar que ele pode contar apenas com os olhos na pilotagem do VANT Ikhana. A imagem à direita mostra o centro de controle, o posto de pilotagem ao fundo e os demais operadores envolvidos na operação. Figuras extraídas da referência (PESTANA, 2011).

Este projeto propõe uma contribuição inovadora e importante para permitir a operação de VANTs no espaço aéreo nacional. *In-Flight Awareness* estabelece o conceito de CS em aeronaves não tripuladas de forma única, pois busca aumentar a segurança de voo através do aumento da percepção da aeronave de sua situação atual (externa e interna), avaliando a partir desta percepção quais são as vantagens e as desvantagens de cada alternativa de ação possível.

2.4.2. *CONCEITOS PRELIMINARES*

Consciência Situacional em Voo envolve a análise de fatores internos e externos, seu uso em um algoritmo, como parte do processo de tomada de decisões, e ação de acordo com as condições e objetivos atuais. Como vimos, para incrementar as condições para um voo seguro e eficiente de VANT, este trabalho propõe um processo semelhante ao encontrado em Endsley, (ENDSLEY, 1995), para alcançar a consciência situacional em sistemas dinâmicos. Para o IFA, em um primeiro nível (nível 1), os dados de fontes internas e externas são coletados e usados em um algoritmo desenvolvido e adaptado a uma situação específica, a plataforma utiliza estes dados para definir uma situação corrente, nível 2, e age em conformidade para atingir uma situação desejada (nível 3). Veja (ENDSLEY, 1996).

Naderpour (NADERPOUR, LU e KERRE, 2012) fez uso de conceito de Endsley, (ENDSLEY, 1995) e (ENDSLEY, 1996), e destaca a importância do processamento da informação que vem de fontes de dados (sensores). Adicionalmente, Naderpour (NADERPOUR, LU e KERRE, 2012) enfatiza um processo adequado de tomada de decisão para atingir com sucesso os níveis 2 e 3 e propõe conceitos e metodologias aplicadas para situações de crise. Embora o trabalho de Naderpour (NADERPOUR, LU e KERRE, 2012) não tenha relação com uma plataforma VANT, vale a pena notar que IFA também reconhece como essencial o uso de sensores apropriados para perceber uma determinada situação e seus arredores, e que os conceitos e metodologias devem ser aplicados tendo em conta as diferentes situações possíveis. Neste sentido, considerando o voo como uma situação sempre crítica, o trabalho de Naderpour citado se faz válido e útil para o estabelecimento de IFA em um VANT.

Endsley (ENDSLEY, 2001) aborda CS para os operadores de VANT usando análise de tarefa dirigida a objetivos para definir quais aspectos adquiridos são importantes para a consciência da situação. Diferentemente da abordagem de Endsley (ENDSLEY, 2001), que enfatiza os aspectos importantes de planejamento de missão, o IFA tem foco na operação segura de aeronaves e atua como um subsistema de supervisão. Para o IFA, todos os três

níveis de tomada de decisão mencionados são centrados na plataforma. No nível 1, os dados de vários sensores são usados em um algoritmo para identificar eventos e sintomas que saiam do que for considerado normal e seguro. Da mesma forma como um médico identifica potenciais problemas de saúde causados por doenças em seus pacientes, a fusão e compreensão dos dados obtidos dos sensores (eventos) ajudam a distinguir os sintomas e, conseqüentemente, o reconhecimento precoce de falha e situações potencialmente perigosas à segurança de voo. No nível 2, usando os sintomas identificados, algoritmos baseados em uma árvore de decisão podem calcular a gravidade de um determinado evento para a segurança de voo para, finalmente, definir e executar as ações necessárias (nível 3).

Na referência (MACHUCA, MILLER e COLOMBI, 2012), os autores reconhecem a necessidade de um conjunto de informações para alcançar CS. Este trabalho enfatiza que um operador de VANT deve estar ciente das condições externas e internas (ambiente circundante e saúde do sistema, respectivamente), bem como das eventuais ameaças provenientes de um ambiente dinâmico, para poder projetar as próximas ações das aeronaves. A abordagem IFA é muito semelhante a esta, mas difere por ser centrada na plataforma. Embora a presença do operador seja importante na operação e haja compartilhamento de dados com a estação de controle, os esforços deste trabalho são feitos para fazer plataforma tão consciente quanto possível da situação atual (interna e externa). Obviamente, em algumas situações particulares, o operador pode optar por uma ação diferente e sobrepujar as decisões tomadas pelo sistema supervisor IFA.

O trabalho de Tulum et al. (TULUM, DURAK e İDER, 2009) se refere às capacidades de mudança automática de rota para os VANTs. Levando em conta a missão a ser cumprida e restrições do ambiente aéreo e terrestre, eles apresentam um algoritmo capaz de otimizar atualizações no plano de missão anteriormente armazenado. É interessante assinalar o reconhecimento dos autores do artigo sobre a necessária consciência da aeronave para lidar com as mudanças ocasionadas por fontes externas. Ao contrário da abordagem adotada pelo IFA, o trabalho de Tulum et al. (TULUM, DURAK e İDER, 2009) considera apenas fontes

externas como um gerador de agente de uma nova rota. Seus resultados podem ser utilizados, de forma similar, quando existe um problema interno quando, por exemplo, a aeronave deve retornar às coordenadas da estação de controle ou encontrar o melhor local para um pouso forçado.

No artigo de referência (BUSH, WANG e WILLIAMS, 2012), Bush et al. apresentam a importância da autonomia da máquina para as ações, sob supervisão, e enfatizam que a orientação de alto nível fornecida por seres humanos deve ser suficiente para os VANTs desenvolverem as suas missões. No trabalho citado, risco é uma linha de base para o estabelecimento das restrições da missão, que são algumas áreas e condições que devem ser evitadas, ou não, dependendo do risco que um operador está disposto a assumir antes de decolar. A definição de um limite de risco é importante para o IFA, pois condiciona as possíveis ações decorridas de eventos, bem como a sua independência em relação a ações.

Os riscos de replanejamento de rota também foram considerado por Theunissen et al., (THEUNISSEN, BOLDERHEIJ e KOENERS, 2005). No entanto, neste caso, a avaliação de risco é utilizada para aumentar a CS do operador e não como uma ferramenta para aumentar o nível de automação da plataforma aérea, como no caso de Bush et al., (BUSH, WANG e WILLIAMS, 2012). É interessante ressaltar embora o IFA considere a presença humana no *loop* de comando e reconheça a importância de manter a equipe de terra atualizada da situação do voo, seu foco é a automação e aumento da consciência e da inteligência da plataforma, o que a torna diferente da abordagem dos dois artigos citados neste parágrafo.

O artigo (NADERPOUR, LU e KERRE, 2012) oferece uma estrutura muito útil para o desenvolvimento de um modelo de IFA. Naderpour et al. (NADERPOUR, LU e KERRE, 2012) propõem um modelo conceitual capaz de fornecer avaliação de risco durante a execução da missão, basicamente seguindo os três níveis como proposto por Endsley (ENDSLEY, 1988). Isto significa obter e compreender diversos dados dinâmicos de forma constante, projetá-los no futuro e agir quando necessário para evitar situações de risco. A abordagem adotada pelo IFA difere dos modelos de Naderpour et al., pois assume que a

aeronave é o primeiro tomador de decisão e que o operador atua como supervisor e como segundo nível de decisão. Esta diferença notável não invalida de forma alguma os conceitos apresentados nos modelos de Naderpour et al., pois estes servem como referência para adaptação à nova abordagem do IFA.

Drury et al. (DRURY, RIEK e RACKLIFFE, 2006) apresentaram uma análise sobre os elementos necessários para Consciência Situacional (CS) dos operadores. Eles consideraram muitos dos elementos necessários a serem constantemente inspecionados por sensores, como a integridade e a saúde da aeronave, ou fornecidos por elementos externos, tais como o controle de tráfego aéreo. Por obtenção desta CS, os autores indicam: relação espacial 3D entre o VANT e seu ambiente; Meteorologia ao redor do avião; Saúde da plataforma; Estado atual; Lógica embarcada; ameaças operacionais; missão, progresso para completar a missão; grau de confiabilidade; comandos humanos necessários para controlar o VANT e restrições impostas pelos humanos que possam exigir a modificação do curso de ação ou descumprimento de um comando. O IFA pretende fornecer meios para uma aeronave voar da forma mais autônoma quanto possível, utilizando conceitos pré-definidos de operação, para promover a eficiência e cumprimento da missão de segurança de voo. Imagine que o operador tenha traçado a rota em que haja um voo a baixa altura sobre uma usina nuclear ou que o operador comande uma rota de choque com o solo, neste caso, o sistema embarcado IFA intervém e não realiza a ação comandada pelo operador e o informa. O IFA se preocupa também em proporcionar meios para o controle de tráfego estar ciente das condições de VANT para que sejam capazes de realizar suas respectivas tarefas. Neste sentido, o IFA atua não somente para melhorar a consciência das aeronaves, mas também para diminuir a carga de trabalho do operador e, ao mesmo tempo, para melhorar sua conscienciência situacional, assim como os órgãos ATC. IFA entende o futuro de forma muito semelhante ao apresentado em Bush et al. papel (BUSH, WANG e WILLIAMS, 2012), uma vez que este compreende que uma consciência situacional melhorada é necessária para que os VANTs possam tomar

decisões por si só, mantendo obviamente os níveis de segurança de voo compatíveis com os da aviação tripulada.

O trabalho de Durrant-Whyte e Stevens (DURRANT-WHYTE e STEVENS, 2001) apresenta uma situação em que o conceito de IFA pode ser de particular interesse. Este trabalho considera múltiplos VANTs coletando informações e cada um deles como um nó (uma plataforma que transporta sensores em uma rede descentralizada). Ele enfatiza a fusão baseada em rede de dados em que cada VANT coleta, processa e compartilha resultados com seus pares. Nesta situação, o IFA poderia fornecer recursos adicionais, tais como uma melhor compreensão das novas restrições, e que não foram considerados durante o planejamento da missão (antes da decolagem), reconfiguração da rede em caso de perda de um ou mais VANTs, fornecimento de informação adicional para o controle de tráfego aéreo sobre a posição das plataformas sem piloto em baixa altitude e, eventualmente, condições locais de meteorologia.

(VELAGAPUDI, OWENS, *et al.*, 2009) , analisaram a influência dos fatores ambientais no momento do voo nos pilotos. Verificaram, no estudo, como o ambiente afeta a CS dos pilotos no caso em que os mesmos não estão no mesmo local dos VANTs. Aqui o foco não está na plataforma aérea, mas no piloto, tendo pouca aplicação em IFA.

Também na linha de avaliação de CS dos pilotos de VANT, (CALHOUN, DRAPER e RUFF, 2009) verificam como o nível de automação afeta o desempenho em tarefas relacionadas ao estabelecimento de rotas. O estudo mostra que o aumento da automação aumenta o tempo necessário para os operadores completarem as suas tarefas, pois gastam tempo verificando a acurácia dos sistemas embarcados de apoio à decisão. Apesar de voltado aos pilotos, este resultado é do interesse do IFA, pois o ser humano deverá ficar no *loop* de controle por muitos anos e deverá manter a supervisão sobre as ações da aeronave.

(BABER, GRANDT e HOUGHTON, 2009) exploraram a relação entre os dados provenientes do VANT e seu processamento na cadeia de comando e controle. Exploraram

também diferentes configurações de comando para avaliar como a carga de trabalho, consciência situacional e tomada de decisão são afetadas. Apesar de fora do escopo de IFA, a inserção da aeronave em uma estrutura de comando e controle, e o impacto de seu nível de automação poderão ser foco em estudos posteriores.

(GARTENBERG, MCCURRY e TRAFTON, 2011), verificaram as alterações de CS em pilotos após um intervalo de atividades. Os pilotos, neste caso, estavam envolvidos em múltiplas tarefas e, em alguns casos, no controle de múltiplos VANTs.

Um conceito diferente é apresentado no trabalho (OZARTAN, AKGUL e AKCA, 2013). Ao contrário de soluções de engenharia, esta referência apresenta algumas alternativas de operação baseadas na experiência de produção e uso em campo acumuladas pelos EUA nos últimos anos. Apesar de pouco relacionada ao IFA, o entendimento da realidade de campo e opções de operação são elementos básicos para o projeto de um sistema de segurança de voo.

Como indicado anteriormente, a maioria dos trabalhos relacionadas à CS de VANTs estão focados no seu operador, como é o caso do trabalho de Endsley (ENDSLEY, 1996). No entanto, este traz uma análise interessante sobre os fatores e mecanismos que podem afetar a consciência situacional do operador, mostrando as mudanças do nível de atenção dos operadores dependendo se sua participação ativa ou passiva, da qualidade de feedback fornecida pelo VANT e do nível de compreensão de como a automação das aeronaves realmente funcionam (como o VANT percebe o mundo ao seu redor e age?).

O trabalho de (OZARTAN, AKGUL e AKCA, 2013) faz uma análise sobre custos comparados entre aeronaves pilotadas e não pilotadas e descreve consciência situacional, sob o ponto de vista de conhecimento de um campo de batalha. A análise econômica foi bem restrita, pois considerou somente custos de formação de piloto de um B-52 e forneceu dados de formação de pilotos de VANT, que diferem da experiência brasileira. No que se refere à CS do campo de batalha, a análise pode vir a ser interessante quando forem considerados os

elementos associados ao cumprimento da missão, não de segurança de voo, como se faz para IFA.

(CHEN, BARNES e HARPER-SCIARINI, 2011), apresentam um artigo bastante completo que aborda um tema de particular interesse para o IFA: Supervisão do operador. Esta questão é central para o IFA na medida em que devemos considerá-la para estabelecer os limites em que a aeronave tomará suas decisões sozinha e as informará ao operador ou, ao contrário, deverá esperar pela decisão dele. Cabe ressaltar que este artigo usa os mesmos conceitos de CS usados nesta tese e estabelece um grau de medida de autonomia, que deixamos uma adaptação abaixo, Tabela 2-4. Um sistema IFA visa permitir que a aeronave seja capaz de tomar decisões rápidas e de forma independente do operador, pois lidando com segurança de voo e situações potencialmente desastrosas, o tempo disponível para ação pode ser muito curto. Apesar de ser necessária uma análise para cada caso particular, podemos esperar níveis altos de automação para IFA.

Tabela 2-4. Níveis de automação, adaptado de (CHEN, BARNES e HARPER-SCIARINI, 2011).

Alto	10	Total Autonomia: A aeronave toma todas as decisões, age de forma autônoma e ignora o operador humano.
	9	A aeronave informa o operador, somente se ela decidir que deve.
	8	A aeronave informa o operador, somente se ele pedir.
	7	A aeronave executa as ações automaticamente e depois informa ao operador se necessário.
	6	A aeronave fornece um breve período de tempo ao operador para que ele possa vetar uma ação, antes que ela seja automaticamente executada.
	5	A aeronave envia uma sugestão ao operador e a executa após aprovação.
	4	A aeronave sugere uma alternativa de ação ao operador.
	3	A aeronave analisa e seleciona algumas alternativas de ação ao operador.
	2	A aeronave oferece um conjunto completo de alternativas de ação ao operador
Baixo	1	Operação Manual: A aeronave não oferece nenhuma ajuda ao operador, que deverá tomar todas as decisões e ações.

2.4.3. REVISÃO DE PROJETOS DE SISTEMAS DE CONSCIÊNCIA SITUACIONAL

A revisão bibliográfica aborda as questões de projeto, pois entende que o sistema IFA deve necessariamente ser considerado desde o início do estabelecimento dos requisitos técnicos e funcionais. A inserção de um sistema embarcado em uma aeronave pronta será em geral mais difícil, pois deverá competir com os outros equipamentos por energia, espaço e capacidade de carga disponíveis. A inserção de IFA desde o início do projeto facilitará aos engenheiros envolvidos adicionar somente o necessário para uma plataforma realizar a sua missão com segurança. Assim, uma série de trabalhos é verificada para entendimento da abordagem que vem sendo adotada neste aspecto específico.

Os autores do trabalho (ENDSLEY, 1996) entendem que a CS deve ser considerada como um tema central durante o projeto do sistema autônomo. Sistemas e situações diferentes podem levar a diferentes níveis de automação, o que significa diferentes níveis de autonomia para o VANT (ou para o operador). A Tabela 2-5 é baseada no trabalho (ENDSLEY, 1996) e as alterações advém do reconhecimento que o nível de controle do operador muda quando se visa à automação completa da plataforma e se considera o operador como um supervisor e em um nível mais alto na cadeia de tomada de decisões, podendo alterar as decisões tomadas pelo VANT e assumir controle da situação (operador sempre no *loop*). Outra diferença que o leitor deve notar na Tabela 2-5 é a indicação de dois aspectos diferentes de voo de um VANT: controle de voo e controle de carga útil. IFA se preocupa exclusivamente com a segurança do voo.

Tabela 2-5. Níveis de Controle e Automação para um VANT usando o sistema IFA. Adaptado de (ENDSLEY, 1996)

Nível de Automação	Tarefas				Observações
	Piloto	Controle de voo do VANT	Operador de Carga Útil	Controle de Carga Útil do VANT	
Suporte à Decisão	Consente	Decide, Sugere, Age	Consente e/ou Age	Decide, Sugere	Missões de alta sensibilidade e/ou de risco, tais como os de lançamento de armamento.
Consensual	Veto	Decide, Age	Consente	Decide, Sugere, Age	Missões ainda sensíveis e/ou de risco, mas, neste caso, o operador autoriza (ou não) a ação do VANT. Algumas missões militares podem exigir este nível de automação.
Monitorada	Veto	Decide, Age	Veto	Decide, Age	Neste caso, a aeronave realiza a missão de forma autônoma, mas sob a supervisão do operador. No caso do operador considerar necessário, ele ou ela pode negar e sobrepujar a decisão do sistema.

Apesar de ainda ser focada no lado do operador, Endsley (ENDSLEY, 2001) forneceu boas pistas sobre como organizar um sistema de supervisão destinado a melhorar a consciência da aeronave. Levando-se em conta as limitações do operador, Endsley (ENDSLEY, 2001) enfatizou a necessidade dos níveis alto e baixo para lidar com os objetivos da missão, bem como dos dados coletados durante o voo. No caso do IFA, os objetivos da missão e dados provenientes da carga útil, ou de outro sistema orientado à missão, são processados juntamente com os dados dos sensores que avaliam as condições internas e externas à aeronave, para melhorar a segurança de voo. IFA visa segurança, não o cumprimento da missão. Como sugerido por Endsley (ENDSLEY, 2001), displays multi-

modais podem ser usados para manter o operador da estação de controle atualizado das condições de voo.

Uma abordagem interessante foi fornecida por Seppanen et al. (HANNES SEPPÄNEN, 2013). Seppanen et al. (HANNES SEPPÄNEN, 2013) criaram gatilhos (que chamamos eventos) para definir as informações necessárias para compreender a situação atual (sintomas a partir de dados internos e externos) como um caminho para estabelecer ações conseqüentes. Usando eventos (gatilhos) e identificação de sintomas, é possível a utilização de um algoritmo pré-definido para descobrir a situação atual e, eventualmente, fazer uso de outros algoritmos para que haja ações automáticas por parte da aeronave ou solicitar ao operador para fazê-lo. O IFA adota formato semelhante para definição das ações, no sentido em que faz uso de eventos e sintomas como gatilhos para disparar ações que visem a melhoria da segurança.

Uma abordagem de particular interesse para evitar colisões em voo pode ser encontrada nas referências (MCAREE e CHEN, 2011) e (MCAREE e CHEN, 2013). Os autores concentram seus esforços em voos de VANTs próximos a aeródromos e predizem a trajetória das outras aeronaves baseando-se nas informações disponíveis do sistema ADS-B. Eles adicionaram “artificial” à expressão consciência situacional para enfatizar que a trajetória das outras aeronaves é presumida, baseando-se nas regras de tráfego aéreo.

Dados com pouco uso imediato para aplicação em aeronaves de asa fixa, mas com potencial para o futuro, podem ser encontrados na referência (PRIOR, SHEN, *et al.*, 2009). Os autores apresentam o desenvolvimento de aeronaves multirotores para uso urbano e enfatizam a necessidade de maior consciência situacional para evitar danos a civis (o trabalho tem cunho militar). O interesse futuro para o IFA advém do fato de que os VANTs estarão mais presentes no cotidiano das pessoas na medida em que se tornarem mais confiáveis, no que se refere à segurança de voo, e as aplicações urbanas crescerão como consequência direta.

Uma abordagem diferente de IFA, mas ainda assim voltada ao aumento de consciência situacional em uma situação específica, é apresentada em (DUNKEL, LINK e VERGE, 2012). Os autores tratam de CS obtida através de um radar voltado ao ambiente marítimo. CS aqui é entendida pelo sensor e sistemas adicionais de enlace de dados entre o VANT e sua estação de controle. Interessante registrar que, neste caso, a estação de controle fica embarcada em uma aeronave tripulada, um Beechcraft Super King Air 200 adaptado, não em solo.

As técnicas apresentadas por (BOCANIALA e SASTRY, 2010) podem (ou devem) ser usadas na implementação de um sistema IFA, pois incrementam a CS dos operadores através dos dados de CS obtidos pela aeronave, quando necessário. Mesmo que o modelamento adotado pelos autores a sistemas complexos não seja aplicado, um sistema IFA embarcado deve sinalizar ao operador quando existem situações de alto risco identificadas ou quando o operador coloca a aeronave em situação de risco. Desta forma, um sistema IFA poderia monitorar erros humanos além da dinâmica ambiental e saúde da plataforma.

Com foco no aumento de CS dos operadores de VANTs, o trabalho de (FUCHS, FERREIRA, *et al.*, 2013) apresentou diferentes telas aos operadores de VANTs e analisou os resultados. Este trabalho tem pouco a contribuir com o IFA neste estágio da pesquisa.

(LIE e GO, 2010), apresentam simulações utilizando diversos VANTs voando em formação, considerando um intervalo de tempo e restrições (evitar colisões entre os aviões e com obstáculos). O enfoque deste trabalho é no controle dos parâmetros e não em CS dos VANTs.

Um trabalho que se aproxima do conceito de IFA pode ser encontrado em (PASTOR, ROYO, *et al.*, 2012), com seus conceitos advindos de (ROYO, LÓPEZ, *et al.*, 2008). No primeiro, ele cria o conceito de gerenciamento de contingenciamento em voo e visa criar mecanismos que permitem uma rápida reação da aeronave. Ao contrário do IFA, que se ocupa exclusivamente da segurança de voo, Pastor inclui a missão e a carga útil na sua lista

de serviços a serem gerenciados e acompanhados. IFA acaba por considerar de forma mais ampla o ambiente circundante à aeronave assim como a sua saúde de forma mais detalhada, mas diversos conceitos e abordagens daquele trabalho serão úteis no desenvolvimento deste trabalho. A Figura 2-3 apresenta um modelo baseado em serviços diversos, tais como de voo (navegação), missão, carga útil e de consciência (para evitar colisões em voo).

Figura 2-3– O modelo conceitual criado por em (PASTOR, ROYO, *et al.*, 2012) visa criar condições para uma tomada rápida de decisão.

O trabalho de (FORTMANN e LUDTKE, 2013) apresenta um aumento de CS de operadores. Ele introduz um sistema inteligente de CS para otimizar as tarefas dos operadores com pouca relação direta com os conceitos de IFA, mas pode ser usado no futuro, em outros trabalhos, para melhorias na estação de controle.

(SCANLON e LUDWIG, 2011) apresentam um experimento voltado ao CS de uma missão e não da aeronave não tripulada. Apesar da pouca relação com o tema central desta tese, este trabalho mostra claramente a importância da fusão de dados de diferentes fontes para a obtenção de compreensão do cenário. O experimento conduzido em ambiente urbano mostra que os diferentes sensores apresentam diferentes resultados quando submetidos ao

ambiente real e que a consideração de diferentes fontes ajuda na compensação de erros e melhoria na precisão das medidas.

O trabalho (MACHUCA, 2012) traz consciência situacional no contexto de controle de múltiplas plataformas VANT. O artigo mostra as dificuldades envolvidas neste controle múltiplo e resalta alguns aspectos relevantes. Neste sentido, ele tem pouco a agregar diretamente a esta tese neste momento.

Byers (BYERS, 2010) utiliza o conceito de consciência situacional no sentido do entendimento de um cenário e visando a coordenação de forças militares em ação. Apesar de seu uso imediato para esta tese ser pequeno, o trabalho de Byers pode vir a ser útil no futuro para a integração do VANT em um sistema maior. Esta tese tem foco na plataforma, tornando mais confiável, mas em uma etapa posterior pode ser verificado se é possível um aumento desta confiabilidade através de melhorias no sistema em que o VANT está imerso.

2.4.4. AVALIAÇÃO

Avaliação do nível de consciência requer uma abordagem cuidadosa e a maior parte da literatura é dedicada para melhorar e medir consciência situacional humana, seja como operador, piloto ou comandante de operações.

Metodologias foram desenvolvidos para medir a percepção (como a SAGAT e a SART, veja em (ENDSLEY, 1996)), mas elas divergem em que exatamente deve ser medido (DRURY, RIEK e RACKLIFFE, 2006). Citando Drury et al. (DRURY, RIEK e RACKLIFFE, 2006):

"Quanta atenção é necessária? As pessoas podem responder corretamente a perguntas aleatórias sobre o meio ambiente, quando interrompidas em suas tarefas? O resultado da tarefa está correto, o que implica que as pessoas que a executam devem ter tido boa CS?"

(“How much attention is required? Can people answer random questions correctly about the environment when interrupted in their tasks? Is the task outcome correct, thus implying that people performing those tasks must have had good SA?”)

Como exemplo da metodologia desenvolvida para medir a CS do operador, pode-se citar a Técnica de Avaliação Global de Consciência Situacional do Operador (*Situation Awareness Global Assessment Technique*, SAGAT), tal como apresentado por Endsley (ENDSLEY, 1996). O objetivo desta técnica é fazer com que as medidas de nível de conscientização de forma tão direta e objetiva quanto possível. Neste caso, além das entrevistas com os operadores, também são considerados os conceitos da avionica, projeto dos monitores e a interface homem-máquina adotada.

Desenvolvido para evitar avaliações pessoais provenientes dos relatórios fornecidos pelo operador e outros profissionais diretamente envolvidos na operação de VANTs, Meda et al. (MENDA, HING, *et al.*, 2011) realizaram medidas de atividades cerebrais durante a execução da tarefa. Eles usaram uma técnica de imagem do cérebro chamada Espectroscopia Funcional em Infravermelho Próximo (*Functional Near-Infrared Spectroscopy*, fNIR) para inspecionar as atividades cerebrais de uma forma não invasiva. Este estudo, apesar de interessante para operadores, tem pouco ou nenhum uso para o caso de consciência situacional de máquinas VANT.

Reconhecendo que a automação, por vezes, confunde os operadores, Parasuraman et al. (PARASURAMAN, COSENZO e VISSER, 2009), propuseram um teste destinado a medir a eficácia da automação sobre a perspectiva de desempenho do operador de VANT. Nesta pesquisa, foram usadas as pessoas operando vários VANTs e VSNTs, veículos de superfície não tripulados (ou em inglês GUV, *Ground Unmanned Vehicles*), em situações simuladas muito demandantes. Seus resultados mostram que a automação adaptativa aumenta a consciência situacional do operador e diminui a carga de trabalho. Embora o IFA enxergue CS a partir do ponto de vista da aeronave, a questão central é segurança de voo e,

consequentemente, é importante levar em consideração que há um ser humano no circuito e este operador deve estar ciente da situação atual e detectar alterações com rapidez e precisão. Do ponto de vista da segurança de voo, é importante manter os seres humanos capazes de interferir quando necessário e a implementação de sistemas IFA deve levar esta capacidade de intervenção humana em consideração.

O artigo (FERN e SHIVELY, 2009) apresenta uma avaliação do nível de CS de operadores em uma situação em que os mesmos controlam três aeronaves e o nível de automação varia. O objetivo do experimento foi avaliar uma nova interface chamada “Playbook” no que se refere à sua capacidade de aumentar a CS e reduzir a carga de trabalho dos pilotos.

Uma avaliação interessante de CS foi feita para medir o desempenho de pilotos e é apresentada na referência (FERN, KENNY, *et al.*, 2012). Este trabalho apresenta os resultados de simulações nas quais pilotos voaram em um ambiente de tráfego aéreo controlado e executando missões com cargas variadas de tarefas. Esta abordagem pode ser interessante para avaliar de forma direta a introdução de novos sistemas e capacidades do IFA nas aeronaves. No entanto, a avaliação de CS foi feita na forma de perguntas aos pilotos e para o IFA será necessário buscar um formato de medida menos sujeito à interpretações humanas.

O trabalho (YI, SONG, *et al.*, 2006) é voltado para a avaliação da carga de trabalho de pilotos de VANTs com o objetivo de desenvolvimento de interfaces humano-máquina mais apropriadas. Como esperado, os resultados obtidos através de questionários para os pilotos demonstram que cargas de trabalho grandes levam a pouca percepção do ambiente (baixa CS). Este trabalho tem pouca influência atual no desenvolvimento de sistemas IFA.

2.4.5. *TECNOLOGIAS FACILITADORAS*

A literatura apresenta uma série de tecnologias de base que foram desenvolvidas para facilitar a implementação de consciência situacional. Mais uma vez, no entanto, o foco tem sido na direção de considerar CS apenas para o operador humano, não para a aeronave. Mesmo quando voltadas ao operador, as tecnologias facilitadoras foram incluídas na revisão para ajudar no guiamento das definições que serão adotadas no projeto de um sistema IFA embarcado. Os autores listados apresentaram soluções para os problemas identificados e estas poderão ser aplicadas neste trabalho ou em futuros desenvolvimentos.

Integração

Sward (SWARD, COOPER e SPARKMAN, 2005) criou um aplicativo GIS para fazer a interface com o piloto automático a bordo do VANT. Basicamente, este sistema cruza o fluxo de vídeo com um mapa centrado na posição atualizada do VANT, tornando mais fácil ao operador identificar as características do solo capturadas pelo vídeo com as apresentados no mapa. A consciência situacional aqui se refere à realização da missão, no entanto, o conhecimento do terreno sobrevoado é essencial à IFA, como vimos.

Gomez-Acevedo (GOMEZ-ACEVEDO, 2012) apresentou um modelo matemático visando a melhoria da CS do piloto através de uma melhor exibição do espaço tridimensional em torno do avião em voo. Pode-se, de fato, criar novas telas e apresentar informações que levem em conta a dinâmica do ambiente e da plataforma aérea. Embora o trabalho de Gomez-Acevedo (GOMEZ-ACEVEDO, 2012) não tenha sido desenvolvido para pilotos de VANT, esta linha pode realmente ser usada neste caso e para o IFA fica a tarefa de identificar quais as informações devem ser transmitidas para acompanhamento efetivo na estação de controle.

Comunicação em Rede

(BEHNKE, DANIEL e WIETFELD, 2011) propuseram algoritmos para melhorar uma rede do tipo *mesh* aérea (ZHANG, LUO e HU, 2006). A solução proposta por Behnke foi direcionada para melhorar a eficiência da missão, contudo, o compartilhamento de informações entre as plataformas também pode ajudar no incremento da segurança aérea. Um evento detectado por uma aeronave poderia ser compartilhado e passado para todas as aeronaves na área. Podemos imaginar uma situação hipotética em que uma floresta em chamas esteja atrapalhando a visibilidade das aeronaves em voo em baixa altitude. Neste caso, a aeronave que detectou a fumaça disponibilizaria, de forma automática na rede, a informação de que um determinado setor geográfico deve ser evitado em voos em baixa altura. Ou ainda que uma aeronave intrusa (não informada pelo órgão de controle), foi identificada e que cuidados adicionais devem ser tomados para evitar colisão em voo. Assim, A solução proposta por Behnke pode ser utilizada nas implementações do IFA.

(POJDA, WOLFF, *et al.*, 2011) analisaram o desempenho de alguns protocolos de roteamento de rede tipo *mesh*, visando aplicações em que é empregado um enxame de VANTs (*swarm*, dois ou mais VANTs em voo coordenado). Apesar de ter sido desenvolvido para plataformas aéreas autônomas mini, ou seja, áreas pequenas, e ser desnecessária a coordenação com o Controle de Tráfego Aéreo e com aeronaves fora da rede, uma das características interessantes do trabalho de Pjoda é a consideração de um cenário contendo muitas redes diferentes, como de outras frotas de aeronaves (ou enxames) e a rede de telefonia celular. O IFA poderia fazer uso destas redes como forma de receber e enviar dados.

Uma abordagem particularmente interessante é proporcionada no trabalho de (BÖK e TÜCHELMANN, 2011). Um esquema de consciência de contexto (*context-aware*) é descrito neste trabalho e um processo é definido a partir de uma tarefa de alto nível. Definido este início em um nível mais alto, os níveis mais baixos são estabelecidos para fazer todo o sistema funcionar automaticamente. No nosso caso (IFA em VANTs), isso significa que a

frota poderia executar ações com base em seus recursos próprios, em acordo com a situação corrente e com algoritmos pré-armazenados.

Os trabalhos (DANIEL, ROHDE, *et al.*, 2011) e (GODDEMEIER, DANIEL e WIETFELD, 2012) exploraram redes de malha aérea com foco em conectividade ar-ar e ar-terra, respectivamente. Em ambos os casos, micro VANTs são empregados e algoritmos disponibilizados para melhorar a eficiência na área de cobertura. Em outro trabalho, Goddemeier et al. (GODDEMEIER, ROHDE, *et al.*, 2011) apresentam a utilização de uma rede ad-hoc como base para a utilização de VANTs para retransmitir comunicações (*relay*). Estes três trabalhos mostram caminhos para futuros trabalhos relacionados ao IFA.

(BEHNKE, DANIEL e WIETFELD, 2011) propõem soluções centradas em comunicações para exploração de área usando VANTs. Em vez de considerar a posição relativa da aeronave e seu alvo como estática, este trabalho considera que plataformas aéreas estarão imersas em um ambiente dinâmico. Os algoritmos são preparados para resolver as perdas de comunicação, encontrando novos caminhos para manter o funcionamento da rede e tentar manter um fluxo de dados constante e na velocidade necessária.

Uma proposta bastante útil ao projeto e à implementação de um sistema IFA embarcado pode ser encontrada na referência (HOW, FRASER, *et al.*, 2009). O objetivo deste trabalho foi direcionado à identificação de alvos por um ou mais VANTs em um ambiente dinâmico e considerando incertezas associadas através de um algoritmo chamado CSAT (*cooperative search, acquisition, and track*). A arquitetura envolve diversos módulos interconectados que permitem uma avaliação externa constante para a busca e acompanhamento de alvos. Internamente às aeronaves, os módulos trabalham em diferentes níveis, sendo o planejador posicionado em alto nível e o piloto automático em baixo nível. Como diversas aeronaves podem compartilhar informações, conflitos de interpretação podem diminuir o nível individual de CS. Para incrementar a robustez do sistema, o planejador de nível mais alto das aeronaves, chamado Módulo Planejador Embarcado (*Onboard Planning Module*, OPM), compartilha dados com os outros VANTs e atinge uma compreensão de consenso. Existe um

módulo sensor (OVM), um módulo avaliador e tomador de decisões (OPM) e um executor (piloto automático). A Figura 2-4 traz uma visão esquemática da arquitetura do sistema apresentado nesta referência. Apesar de diferente em essência, pois busca segurança de voo e não cumprimento eficiente de missão, uma abordagem semelhante à adotada para o algoritmo CSAT é útil à IFA, pois esta deve manter atualização constante sobre o ambiente circundante a uma aeronave, ser capaz de tomar decisões autônomas sob incerteza e, de preferência, com consenso usando os dados e interpretações de outras aeronaves.

Figura 2-4– Arquitetura adotada para implementação do algoritmo CSAT, conforme referência (HOW, FRASER, *et al.*, 2009).

O trabalho de (ROHDE, PUTZKE e WIETFELD, 2013) apresenta VANTs como relay de comunicações para sanar problemas de comunicação em redes de telefonia celular. Os VANTs são posicionados de acordo com a demanda e com as soluções providas por um algoritmo chamado IPAR. Esta ideia pode ser útil ao IFA se for necessário maximizar a transmissão de dados de uma aeronave fora da área de cobertura. Uma aeronave que necessite

transmitir ou receber dados com urgência, qualquer que seja o motivo, poderia solicitar às outras que servissem de relay. Esta abordagem deve, no entanto, ser deixada para trabalhos futuros para incremento de capacidades de um sistema em particular.

O trabalho (LEONARD, SAVVARIS e TSOURDOS, 2012) apresenta resultados que podem ser úteis em trabalhos futuros. Trabalhando com quadrotores voando em enxame e buscando um ou mais alvos, o trabalho apresenta resultados interessantes de minimização de caminho usando algoritmos genéticos. Uma vez que o IFA esteja embarcado em uma aeronave, será interessante extrapolar os resultados para diversas plataformas.

(SCHOEMAKER, SANDBRINK e VAN VOORTHUIJSEN, 2009) e (BURMAN, HESPANHA, *et al.*, 2011) utilizaram uma rede de sensores em dois ambientes: o primeiro no monitoramento de estradas e o segundo em aplicações militares. Sensores em solo e no ar tiveram seus dados fundidos e combinados para determinar comportamentos fora do que seria considerado normal para o incremento da segurança nas vias (primeira referência) e para localizar eventos como explosões (segunda referência). Trabalho futuros relacionados ao IFA podem utilizar a abordagem deste trabalho, pois este leva em conta a estabilidade e confiabilidade desta rede de sensores no tempo e algoritmos bio-inspirados.

Na direção de algoritmos genéticos, podemos encontrar uma abordagem que pode ser útil na determinação de rotas destinadas à coleta de dados de sensores (BURMAN, HESPANHA, *et al.*, 2012). Apesar do IFA estar descorrelacionado da execução da missão, em casos específicos o conhecimento da posição de sensores em solo pode ser útil ao replanejamento de rota. Além disso, algoritmos genéticos podem ser úteis como forma de recálculo rápido de rota.

Localização e Posicionamento

O trabalho de Carnie et al. (CARNIE, WALKER e CORKE, 2006) apresentam uma tecnologia útil para ser usada como um meio para evitar colisões em voo (*Sense & Avoidance*, S&A). Este estudo visou algoritmos para a identificação de aeronaves intrusas através da análise de pontos pequenos imersos em um fluxo de imagens. Tendo em conta que o projeto de VANTs passa necessariamente por restrições de orçamento e recebe apenas os instrumentos necessários para a missão, algoritmos que permitam S&A com cameras simples são mais do que bem vindos. É bastante desejável que aeronaves pequenas e equipadas com cameras de baixo custo sejam ainda assim capazes de identificar a presença de outras aeronaves em rota de colisão.

Em seu estudo, Ramachandran et al. (RAMACHANDRAN, HONG, *et al.*, 2012) examinaram como fazer uso da enorme quantidade de dados que podem estar disponíveis com aplicativos baseados em sensores em grande escala. Embora a capacidade de processamento do hardware e software tenham aumentado muito nos últimos anos, tecnologias adicionais são necessárias para que a plataforma, piloto e ATC façam uso efetivo dos dados disponíveis. Aplicativos devem estar embarcadas na aeronave e instalados na estação de controle e alguns exemplos destacados por Ramachandran et al. (RAMACHANDRAN, HONG, *et al.*, 2012) são os seguintes:

- a. Visão Computacional. Neste caso, o desempenho é medido em termos de precisão (exatidão) e da latência (tempo para entregar informações).
- b. Câmeras inteligentes. Câmeras inteligentes transmitem video e imagens apenas quando necessário, ao invés de fluxos de vídeo. Como exemplo, uma área onde os incêndios florestais são comuns durante determinada época do ano pode ser monitorada e VANTs podem identificar e, atuando como relés, podem receber um alerta e transmiti-lo para a estação de controle e/ou outros sistemas (bombeiros por exemplo).

- c. Infraestrutura *Wireless*. Essa infraestrutura em terra pode ser composta por redes de áreas pequenas e grandes e incorporam um ou mais pontos de acesso para o VANT para *down* e *upload* de dados.

Na linha de evitar colisões em voo, Luo et al. (LUO, MCCLEAN, *et al.*, 2013) assumem que o sinal GPS não está disponível, ou não está confiável, e usa a amplitude de um sinal transmitido para estimar a posição relativa, através de um modelo usando o algoritmo de Filtro de Kalman. Este estudo aponta que sistemas baseados em amplitude não são tão precisos quanto aqueles que utilizam o tempo ou ângulo de chegada, mas vantagens podem ser encontradas quando simplicidade é considerada. Uma referência adicional sobre determinação de posição é o trabalho (FOY, 1976). Esta simplicidade buscada por Luo et al. (LUO, MCCLEAN, *et al.*, 2013) é interessante aos VANTs, particularmente para pequenos (menores que 25kg), pois permite a capacidade de S&A em plataformas com grandes limitações de volume, massa e energia disponíveis. Esta capacidade adicional de S&A pode ser bastante incrementada quando, ao invés de uma aeronave isolada, uma frota realiza medidas diversas e estas são correlacionadas para determinação da posição de uma aeronave intrusa. Certamente um posicionamento mais preciso pode ser obtido com a disponibilização de equipamentos capazes de estabelecer posições relativas exatas, no entanto, é interessante notar que modelo de Luo et al. pode permitir manter uma distância segura, utilizando uma abordagem simples.

Uma solução na direção do aumento de CS do operador VANT na determinação da posição de múltiplos VANTs é oferecida por Lin et al. no trabalho (LIN, LI e LAI, 2012). A proposta abarca um sistema de vigilância baseado em nuvem e, basicamente, a plataforma aérea se conecta com a estação base através da rede móvel 3G, em vez de confiar em um link direto. Esta proposta pode ser usada para criar um sistema alternativo, um em que a plataforma tenha meios adicionais para identificar a sua posição geográfica, sendo assim, útil ao aumento de CS do VANT, além do operador. No entanto, é difícil assegurar que haverá

uma rede confiável disponível em toda a área e, por isso, este sistema pode ser usado como meio de localização somente em situações e aplicações específicas.

Um trabalho visando identificação de outras aeronaves na proximidade usando câmeras infravermelhas pode ser encontrado na referência (OSBORNE, BAR-SHALOM, *et al.*, 2009). Ele identifica a direção relativa da outra aeronave e sua velocidade angular, mas não sua distância. Os resultados deste trabalho têm pouca utilidade no momento, mas podem vir a ser úteis no futuro.

Determinação de Rotas

Embora tenha sido proposto para aumentar CS, Li et al. (LI, HONG, *et al.*, 2012) propõem um modelo para permitir uma plataforma aérea para cumprir uma missão militar de uma forma passiva. O problema aqui é determinação de rota, tendo em conta a falta de precisão da capacidade de detecção de VANTs por radares. Assim, neste estudo referenciado, Li et al. consideram capacidades adicionais de detecção dos radares e as usam na determinação de rota de penetração. Esta abordagem pode ser do interesse de IFA nas missões militares ou naquelas em que se deseja identificar a posição de um VANT em locais de baixa cobertura radar.

Leonard et al. (LEONARD, SAVVARIS e TSOURDOS, 2012) apresentam um modelo útil para ser implementado em uma aeronave com capacidade de IFA. Usando quadrirrotores, Leonard et al. propõe um modelo em que um ou mais VANTs voam em um ambiente dinâmico em busca de algumas áreas e evitam outras. O estabelecimento de um algoritmo capaz de criar um caminho ideal tendo em conta uma quantidade limitada de informações sobre ambiente é fundamental para aqueles que buscam uma melhor consciência situacional. Áreas atraentes podem ser aquelas dentro de uma zona de busca de dados (advinda da missão) e áreas a serem evitadas podem ser nascer devido a um incêndio repentino em uma floresta ou uma nova questão política que torne interdita um determinado setor. A utilização de tal

algoritmo proposto por Leonard et al. (LEONARD, SAVVARIS e TSOURDOS, 2012) no campo e com aeronaves de asas fixas voando a 100 km/h podem exigir atualizações no algoritmo e testes e validações adicionais.

Cook et al. (COOK, SMALLMAN, *et al.*, 2009) usaram um ambiente sintético em 3D para avaliar o desempenho do operador no replanejamento de rota durante o voo do VANT. Este estudo verificou as diferenças de desempenhos dos operadores no replanejamento de rota quando estes estavam em diferentes ambientes externos. Apesar de voltado ao operador, este ambiente pode ser útil à avaliação de sistemas IFA, pois permite melhor compreensão de parte do operador sobre a situação corrente do VANT.

Uma aeronave em voo está constante submetida às alterações no ambiente externo e no estado de seus subsistemas internos. Estas mudanças podem obrigar alterações na rota previamente estabelecida em solo, antes da decolagem, e, assim, a capacidade rápida de atualização de rota se torna importante seja para a execução da missão, seja para manutenção dos níveis de segurança de voo. Uma abordagem que permite o cálculo de rotas em voo, deve ser rápida, consumir relativamente pouco da capacidade computacional, considerar as incertezas e, obviamente, os objetivos e obstáculos. Estes itens são encontrados no trabalho de Blackmore et al. (BLACKMORE, ONO e WILLIAMS, 2011).

Lee et al. (LEE, WALKER e COHEN, 2011) realizaram um trabalho semelhante ao de Blackmore et al. (BLACKMORE, ONO e WILLIAMS, 2011), pois visaram a capacidade de replanejamento de rota, considerando um sistema dinâmico. Contudo, ao contrário destes últimos, a solução encontrada se mostrou demasiado pesada para ser rodada em tempo real, sendo, assim, de pouco uso ao objetivo de IFA.

O trabalho (TOZICKA, ŠIŠLÁK e PECHOUCEK, 2013) provê alternativas aos pilotos no caso de necessidade de replanejamento de rota. Usando algoritmos internos, o algoritmo analisa as possibilidades e as apresenta ao piloto. Apesar de interessante do ponto de vista

operacional, sob a perspectiva de IFA (aeronave toma as decisões), a abordagem deve ser revista, pois se concentra na estação de controle e não no aumento da autonomia da aeronave.

Cook e Smallman (COOK e SMALLMAN, 2010) ressaltaram a percepção restrita dos operadores de VANT e a necessidade de ferramentas adequadas para realizar o replanejamento do voo. Ressaltaram logo na introdução de seu trabalho que “não tripulado” como denominação da aeronave VANT esconde uma realidade de intensa participação humana, e cita que esta é responsável por 60% dos acidentes. Através de entrevistas e análises de situações específicas, explora ambientes em 3D e verifica uma forma de apresentação de informação nas telas dos operadores para incremento de consciência situacional que aumente a eficiência de recálculo de rota. Apesar de pouco aplicável diretamente, este trabalho traz diversos elementos importantes à IFA, como a necessidade de percepção do ambiente para a tomada de decisão e, principalmente, para o cálculo de rota durante o voo. Percebe-se assim, a necessidade de formas de cálculo rápido de rota em voo.

Velagapudi et al. (VELAGAPUDI, OWENS, *et al.*, 2009) estudaram a carga de trabalho dos operadores decorrente do nível medido de consciência situacional. Apesar do trabalho estar concentrado nos operadores do VANT, não na plataforma, pode ser interessante, no futuro, uma medida comparativa do impacto dos sistemas IFA na CS dos operadores em relação aos VANTs sem este sistema.

Wand et al. (WANG, MARTEL e SCHULTZ, 2010) utilizaram dados provenientes do sistema ADS-B para adquirir a posição e vetores velocidade das aeronaves nas proximidades de um VANT. O objetivo do trabalho dos autores era S&A e pode ser aplicada como parte do sistema IFA. Conforme já ressaltado anteriormente neste trabalho, o IFA necessita identificar aeronaves ao seu redor como forma de evitar acidentes aéreos. Com a entrada obrigatória de equipamentos ADS-B em todas as aeronaves em um futuro próximo, esta abordagem para identificação do tráfego aéreo da área deve ser examinada com atenção. Contudo, como também já ressaltado anteriormente, sistemas IFA embarcados necessitam ser escolhidos devem estar em acordo com a aeronave, missão e ambiente.

Hardware e Software

Porcello (PORCELLO, 2012) demonstra o uso da FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) como uma opção para processamento de sinal da carga útil, assim como para o sistema de comunicação. O FPGA foi adotado devido à sua flexibilidade e implementação de hardware mais rápida. Um sistema supervisor como o IFA poderia ser implementado em FPGA, mas separado do sistema aviônico da aeronave, da carga útil e do sistema de comunicações.

(CALHOUN, DRAPER, *et al.*, 2006) e (CALHOUN, DRAPER, *et al.*, 2005) propõe uma maneira de aumentar a CS do operador usando visão sintética sobreposta ao vídeo em tempo real. Usando essa abordagem, os operadores podem facilmente identificar pontos de interesse no cenário e prosseguir a sua missão, utilizando estas informações adicionais acrescentadas. A fusão de dados é interessante para IFA no sentido de entendimento cenário atualizado, mas a abordagem deste trabalho serve somente ao piloto e operador de carga útil do VANT. Um tratamento adicional dos dados poderia servir ao propósito de aumento de CS da aeronave.

(KUVICH, 2004) destaca importância de mais autonomia e recursos autônomos para o VANT e tem um foco na visão computacional para melhorar CS da aeronave e do operador. O trabalho visa diminuir o tempo de processamento a bordo, para permitir que a aeronave identifique e reaja contra as possíveis ameaças.

Higgins (HIGGINS, 2005) usou a Linguagem de Representação de Evento Vídeo (*Video Event Representation Language*, VERL) para identificar alterações na relação entre objetos durante um certo período de tempo. É útil para o IFA, uma vez que permite a identificação de eventos, especialmente àqueles relacionados ao ambiente em torno do VANT. O objeto, neste caso, é a evolução da situação entre elementos e sua mudança ao longo do tempo.

Em seu trabalho, Byers et al. (BYERS, CHUNG e JOHNSON, 2010) propuseram um cenário no qual um único VANT coordena com um veículo terrestre como base para realizar uma ação militar em uma determinada área de interesse. Neste caso, CS foi considerada como fornecida pelo VANT para o veículo na superfície para interceptar o seu inimigo de uma forma eficiente. Devido ao objetivo diferente, muitos dos parâmetros importantes para IFA não foram consideradas, tais como coordenação ar-ar e ar-terra.

Um projeto particularmente interessante para o IFA é apresentado na referência (HU, JELLA, *et al.*, 2011). A empresa americana MITRE desenvolveu e demonstra, neste trabalho, um protótipo embarcado que aproxima o VANT das aeronaves tripuladas no que se refere à interação com outras aeronaves e controle de tráfego. O sistema torna possível ao VANT trocar dados e voz sintética automaticamente durante o voo. Esta abordagem permite melhor inserção do VANT no espaço aéreo não segregado e, ao mesmo tempo, caminha na direção de melhor CS da aeronave não tripulada, pilotos e controlador de tráfego. Ao contrário da abordagem das referências (MCAREE e CHEN, 2011) e (MCAREE e CHEN, 2013), anteriormente citadas, que presume a trajetória das aeronaves ao redor do VANT, aqui o VANT informa posição e intenções e recebe os dados do ambiente ao redor.

O trabalho (RATTADILOK e PETROVSKI, 2013) aplicou conceitos de inteligência artificial (IA) para tratar uma grande quantidade de dados e poder realizar inferências. O sistema apresentado teve como objetivo incrementar a consciência situacional em um ambiente com tráfego aéreo concentrado. Da mesma forma que o trabalho de (HU, JELLA, *et al.*, 2011), a abordagem é do interesse do IFA e poderá ser eventualmente usada.

Reconhecendo as dificuldades na implementação de um sistema de *sense and avoidance* (S&A), a referência (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013) discute questões relacionadas o uso do sistema ADS-B a bordo dos VANTs. O trabalho comenta que o ADS-B deverá estar a bordo de todas as aeronaves tripuladas em 2020 (imposição da FAA) e é uma opção para uso em VANTs, inclusive nos pequenos. Considerando as dificuldades de embarque de um sistema S&A em um VANT e a necessidade do mesmo estar transmitindo

a sua posição e estar atento à posição dos outros aviões, o ADS-B pode ser uma excelente opção para uso pelo IFA para esta finalidade. Dentre as várias configurações propostas pelos autores, considera-se que, respeitando as limitações de pequenos VANTs e a maximização a autonomia da aeronave, duas alternativas são mais interessantes sob o enfoque de IFA (das cinco descritas pelos autores), conforme .

Figura 2-5– Opções para embarcar sistema ADS-B em VANTs pequenos. Adaptado de (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013)

(OSBORNE, BAR-SHALOM, *et al.*, 2011) apresentam um sistema passivo de localização de aeronaves com uso de algoritmo de estimação de vetor velocidade. IFA necessita de sistemas capazes de identificar o risco de colisões em voo como geradores de eventos que podem resultar em ações. O sistema proposto neste trabalho usa camera infravermelha para estimar a velocidade angular dos alvos detectados.

O trabalho de referência (SE, FIROOZFAM, *et al.*, 2009) traz uma ferramenta que pode ser usada em trabalhos futuros relacionados à IFA. Os autores criam modelos computacionais 3D do terreno a partir de video clips para aplicação militar em avaliação de terreno e alvos. O uso imediato deste trabalho não é necessário à IFA, mas pode se tornar tema de trabalhos futuros com resultados de interesse. Caso diversos VANTs estejam voando em voo coordenado em baixa altitude e com poucos dados de relevo local, modelos tridimensionais podem ser interessantes para a manutenção de uma altitude segura.

O trabalho (BOSTIAN e YOUNG, 2013) traz conceitos relacionados à IFA relevantes. Em primeiro lugar, apresenta rádios chamados cognitivos devido ao fato deles estarem “conscientes do ambiente ao seu redor, suas capacidades, regras de operação, assim como necessidades e privilégios do operador”. É um rádio definido por software (rds) com capacidades computacionais e de inteligência artificial que o tornam capaz de adaptar-se em acordo com a situação corrente. Apesar deste trabalho de tese ainda não envolver rds, esta é uma tecnologia que deve ser incorporada assim que possível e utilizando diversos dos conceitos expressos no trabalho de Bostian.

2.5 Considerações Finais

A revisão sistemática de 96 trabalhos científicos permitiu uma visão inicial suficiente sobre a área em que o tema desta tese está posicionado. Verificou-se que a proposta deste trabalho cria um novo conceito em sintonia com o direcionamento dado pelas agências governamentais e é inovadora em diversos aspectos. Diversos elementos relevantes de outros trabalhos foram identificados para formarem o corpo deste trabalho.

Devido à quantidade de trabalhos e assuntos relacionados, mas assim diferentes, a revisão fez uso de uma classificação dos trabalhos. Esta classificação facilitou o entendimento do posicionamento dos trabalhos encontrados e a como eles se relacionam com IFA, no formato entendido neste trabalho de tese.

3 Conceitos Fundamentais

Neste capítulo, apresentamos os elementos essenciais ao desenvolvimento do trabalho. Ele apresenta os conceitos básicos sobre Sistemas de Veículos Aéreos não Tripulados e diversos assuntos relacionados à segurança de voo para posteriormente contextualizar IFA neste cenário. Os temas escolhidos para este capítulo têm como objetivo fornecer dados suficientes ao leitor, mesmo aquele pouco conhecedor de temas aeronáuticos, para a compreensão da validade e inserção da proposta de tese na realidade dos VANTs.

O capítulo inicia apresentando as definições adotadas pela autoridade aeronáutica para sistemas de VANTs e segue com a análise de sua inserção no espaço aéreo. Após estas informações iniciais, é verificado o risco operacional envolvido na operação de aeronaves não tripuladas através de uma análise sobre acidentes aeronáuticos em geral e específico para VANTs, a aceitação de risco na indústria aeronáutica e a avaliação quantitativa na sua operação. Tendo estabelecido a base de apoio, apresenta-se a visão de inserção do IFA dentro do contexto aeronáutico e de segurança de voo.

3.1 Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados – SisVANTs

A FAA e a ANAC definem os veículos aéreos sem piloto a bordo de forma semelhante. A ANAC usa os termos VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) e RPA (*Remotely-Piloted Aircraft*, Aeronave Pilotada Remotamente) para se referir às aeronaves e adiciona a palavra “Sistema” quando soma os elementos adicionais à aeronave necessários ao seu voo, (ANAC, 2012): Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (RARP) e Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado, SISVANT. A FAA adotou os termos RPA e UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), e, em sua normativa de novembro de 2013, usou o termo UAS (*Unmanned Aircraft System*), (FAA, 2013). A denominação RPA foi criada depois de VANT para ressaltar a importância e necessidade de um piloto humano no controle da aeronave, sendo assim, ambas

não possuem o mesmo significado (ANAC, 2012). A denominação Veículo Aéreo Não Tripulado permite a inclusão de aeronaves completamente autônomas, é mais geral, portanto.

Para o objetivo específico deste trabalho, manteremos em mente a necessidade de um piloto no *loop* de comando, mas usaremos o termo VANT por ser mais apropriado aos nossos objetivos nesta pesquisa (tornar a aeronave mais autônoma em decisões de segurança de voo). Com este entendimento claro, podemos iniciar o aprofundamento dos termos e compreensão das definições.

Entendemos SisVANT como um conjunto de alguns elementos básicos e suficientes para permitir o voo de um VANT. Os três elementos essenciais deste sistema são a aeronave, sua estação de controle e o enlace de comunicação entre eles. Apesar de ser dispensável na maioria dos casos, distâncias grandes ou obstáculos entre a estação de controle e a aeronave podem impedir que haja um enlace confiável entre os dois, tornando necessária a presença de um ente adicional que faça esta ponte, chamado *relay* de comunicações. Neste caso, uma antena fixa posicionada estrategicamente, um satélite (seja de órbita baixa ou geoestacionário) ou outra aeronave (pilotada ou não) poderia garantir a manutenção das comunicações transferindo os dados entre ambas. A Figura 3-1 mostra os quatro elementos de um SisVANT e ilustra a opção de *relay* de comunicação sendo realizado por outro VANT ao que realiza a missão principal do Sistema (poderia ser um satélite).

Figura 3-1– O SisVANT envolve uma estação de controle, a aeronave (VANT), um eventual *relay* de comunicações e um enlace rádio para controle da plataforma aérea e sua carga útil.

A operação segura de um VANT envolve uma série de elementos que formam o conjunto SisVANT. Além dos elementos apresentados na Figura 3-1, pode-se encontrar uma série de outros adicionais: equipamentos de suporte (logística, operação e manutenção de pista), cargas úteis, tripulação (pilotos, operadores de carga útil e observadores visuais), sistemas de terminação de voo (em caso de acidentes ou incidentes) e equipamentos de lançamento e recuperação. Estes elementos adicionais se destinam a permitir a operação das aeronaves em acordo com as regras aeronáuticas e com o preconizado pelo fabricante. Esta visão geral permite identificar em que pontos da cadeia uma maior concentração de esforços pode ajudar no aumento da segurança de voo, mas é necessário considerar o preconizado pelas agências de governo responsáveis pela garantia de segurança no espaço aéreo.

Para entendermos como o IFA se insere nesta arquitetura mais ampla de SisVANTs, é necessário explorar as questões de segurança de voo. As políticas e regulamentações dedicadas à segurança na operação aérea se dedicam a três áreas de forma isolada: pessoal, equipamento, procedimentos e operações (FAA, 2013). Conforme veremos no item 3.3, os acidentes envolvem erros na percepção do ambiente interno e externo, assim como falha no atendimento dos procedimentos previstos e estabelecidos pela autoridade e fabricante aeronáuticos. Assim, a segurança de voo na operação de VANTs deve focar não somente no treinamento do pessoal para realização das operações e para execução dos procedimentos previstos, mas na observação de equipamentos que sejam mais capazes de perceber eventuais erros dos operadores assim como avaliar melhor o ambiente interno e externo.

No próximo item, verificaremos de forma geral, como está estruturado o espaço aéreo controlado e algumas questões relevantes à integração dos VANTs.

3.2 Integração dos VANTs no Espaço Aéreo

A integração de VANTs no espaço aéreo não pode ser tratada como algo novo, com novas leis e regras que atendam às suas limitações, mas, ao contrário, observando a legislação vigente atualmente. Ela depende basicamente da comprovação do risco associado à sua operação ser igual ou menor ao valor aceito para as aeronaves com pilotos a bordo.

Os mercados militar e civil têm amplas aplicações para VANTs, mas dificuldades de certificação têm impedido a sua disseminação nas operações no segundo caso. Os órgãos reguladores têm buscado formas de integrar os VANTs no espaço aéreo, mas têm sido cautelosos, pois, como veremos, os índices de acidentes são demasiado altos.

As questões que envolvem esta integração no espaço aéreo são obviamente balizadas pela segurança de voo e pelas características de voo das aeronaves (tripuladas ou não). A Figura 3-2 mostra que estas medidas de segurança são feitas em camadas. A camada mais

externa tem relação com os procedimentos estabelecidos pela autoridade aeronáutica (ANAC no Brasil e FAA nos EUA), pois define regras de operação em função de localidades e capacidades dos aviões. O órgão de Controle de Tráfego Aéreo (ATC, *Air Traffic Control*) é o responsável pelas duas camadas seguintes. Nestas, tendo como ferramentas radares e meios de comunicação para a separação, o ATC usa estratégias não somente para gerenciar as capacidades individuais das aeronaves, a fase e suas condições de voo, mas também a sua própria carga de trabalho. A camada mais interna trata da separação feita pela aeronave; ela percebe de alguma forma o perigo imposto pelo outro avião e evita o acidente (chamado *Sense and Avoidance*, S&A).

Figura 3-2– Camadas formam a estrutura de segurança para evitar colisões em voo, (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013).

Conforme pudemos perceber, a segurança envolve uma série de órgãos e camadas, assim como a vigilância do entorno em que a plataforma está inserida. Para a integração das aeronaves autônomas, é preciso considerar de forma mais cuidadosa o ambiente em que esta se insere. A Figura 3-3 mostra alguns elementos e enlaces que ocorrem na integração do

VANT ao espaço aéreo, adaptada de (WEIBEL e HANSMAN, 2005). Esta figura permite perceber que a garantia de níveis razoáveis de segurança de voo na integração dos VANTs no espaço aéreo necessita considerar um meio complexo e interconectado. Neste sentido, não se trata somente da plataforma aérea, mas o ambiente aeronáutico em que o SisVANT está imerso é que produz diversos elementos que podem potencialmente provocar acidentes.

Tendo como ponto de partida e foco uma maior autonomia da aeronave nas decisões de segurança de voo, é preciso verificar quais medidas podem ser adotadas e em quais destes diversos elementos para efetivamente evitar os riscos ou mitigar as consequências.

Figura 3-3– A integração dos VANTs no Espaço Aéreo deve levar em consideração as interfaces entre o SisVANT e o ambiente aeronáutico. Adaptado de (WEIBEL e HANSMAN, 2005).

As regras de tráfego aéreo foram desenvolvidas considerando um piloto como interface no interior do avião e vimos na Figura 3-3 que existe um ambiente complexo e interligado que deve ser tratado e adaptado para receber aeronaves que não contarão com esta pessoa a

bordo. Se alterar a legislação para se adaptar àquilo em que VANTs não conseguem atender não faz sentido, é necessário fazer evoluir as tecnologias.

A Figura 3-4 foi adaptada do *roadmap* publicado pela FAA em novembro de 2013 visando a integração dos VANTs no espaço aéreo, (FAA, 2013). Ela apresenta alguns aspectos regulatórios, políticas e orientações para guiar a pesquisa e o desenvolvimento na área. Esta figura foi realizada visando a regulamentação sobre a entrada de VANTs no espaço aéreo e permite que as entidades acadêmicas entendam que tipo de direcionamento pode ser dado ao desenvolvimento tecnológico para que os níveis mínimos de segurança de voo sejam atendidos.

Os VANTs devem almejar atender à legislação imposta às aeronaves tripuladas como, por exemplo, certificados de aeronavegabilidade padrão da forma como é exposto no item 21.175 da RBAC 21 (ANAC, 2011). Segurança de voo é o grande componente impeditivo na adoção definitiva de VANTs e não se deve esperar que regras desenvolvidas durante décadas sejam simplesmente esquecidas e reconstruídas para receber uma nova tecnologia, pois vidas estão em jogo.

Podemos perceber que a Figura 3-4 é repetitiva na ênfase aos procedimentos e certificados de aeronavegabilidade (*airworthiness*). Aeronavegabilidade significa segurança na operação de uma aeronave no espaço aéreo e tem algumas componentes importantes: 1) Certificação do produto aeronáutico (projeto, simulações e testes); 2) Fabricação (reflete o projeto certificado); e 3) Manutenção (feita conforme recomendação do fabricante e regras da autoridade aeronáutica). Assim como nas outras aviações, diferentes classes de VANTs têm maior ou menor rigor em seu desenvolvimento para manutenção de sua aeronavegabilidade.

Os VANTs estratégicos, projetados para voo em altitudes e rotas competitivas com aeronaves com pessoas embarcadas, naturalmente atendem às normas aeronáuticas, contudo, como veremos no item 5. Contudo, esta não é uma regra geral e alguns não utilizam

componentes certificados para redução de custos, sobretudo os pequenos. Estes necessitam de métodos alternativos aos praticados pela aviação tripulada para comprovar a segurança de voo e balizar seus projetos para, assim, manter níveis de segurança adequados e ainda o baixo custo.

A fabricação de VANTs no Brasil carece de escala e as unidades têm sido feitas de forma artesanal e com alterações sem controle constantes em seu projeto original. A manutenção também pode ser bastante precária e feita sem o cuidado necessário. Estas e outras razões são a causa do índice demasiado alto de acidentes aeronáuticos envolvendo VANTs.

Figura 3-4– Áreas indicadas pela FAA que requerem pesquisa e desenvolvimento para integração dos VANTs no espaço aéreo. (FAA, 2013)

3.3 Análise do Risco Operacional

Neste item, verificaremos inicialmente o histórico dos acidentes e sua evolução em aeronaves tripuladas e, em seguida, o caso dos VANTs. Verificaremos também os critérios de aceitação de risco e faremos uma breve descrição de formas de avaliação de risco quantitativo na operação de VANTs.

3.3.1. ACIDENTES AERONÁUTICOS

A guisa de esclarecimento, foi deixado abaixo a definição de acidente aeronáutico conforme preconizado pelo CENIPA (BRASIL, 2013):

“Acidente Aeronáutico:

Toda ocorrência aeronáutica relacionada à operação de uma aeronave, no caso de uma aeronave tripulada, havida entre o momento em que uma pessoa nela embarca com a intenção de realizar um voo até o momento em que todas as pessoas tenham dela desembarcado ou, no caso de uma aeronave não tripulada, toda ocorrência havida entre o momento que a aeronave está pronta para se movimentar, com a intenção de voo, até a sua inércia total pelo término do voo, e seu sistema de propulsão tenha sido desligado e, durante os quais, pelo menos uma das situações abaixo ocorra:

- *Uma pessoa sofra lesão grave ou venha a falecer;*
- *A aeronave sofra dano ou falha estrutural;*
- *A aeronave seja considerada desaparecida ou esteja em local inacessível.”*

Os números de acidentes aeronáuticos caíram nos últimos anos como resultado direto do aprendizado acumulado a partir da investigação de suas causas, veja Figura 3-5 (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2013) (BRASIL, 2013). No ano de 2012, o índice de acidentes

da aviação geral foi de $6,78.10^{-5}$, o que significa 6,78 acidentes a cada 100 mil horas de voo (NTSB, NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2013). Contudo, mesmo que em quantidade o número tenha sido reduzido, as causas de acidentes são recorrentes e a FAA apresenta uma lista de dez agentes, envolvendo o piloto, que permanecem estáveis ao longo dos anos (FAA, 2013):

1. Planejamento e/ou prevoo inadequados;
2. Falha em obter e/ou manter a velocidade de voo;
3. Falha em manter o controle de direção;
4. Nível inadequado;
5. A falta em ver e evitar objetos ou obstáculos;
6. Má gestão do combustível;
7. Planejamento ou decisões de bordo inadequados;
8. Erro de julgamento de distância e velocidade;
9. Seleção de terreno inadequado para pouso; e
10. A operação inadequada dos controles de voo.

Uma análise dos dez itens acima permite classificar as causas de acidentes em três agrupamentos: 1) Falha no cumprimento dos procedimentos de operação previstos; 2) Falha na percepção do ambiente externo; 3) Falha no acompanhamento das condições dos sistemas da aeronave. Segundo (COOK e SMALLMAN, 2010), o fator humano é responsável por 60% dos acidentes.

Figura 3-5– Evolução de acidentes aeronáuticos com as associadas fatalidades ao longo da história ocorridos com aeronaves civis de transporte de passageiros com mais de 14 pessoas a bordo. Adaptado de (FLIGHT SAFETY FOUNDATION, 2013).

Da mesma forma que nos EUA, através da FAA, o Brasil realiza o acompanhamento dos acidentes de forma a determinar as suas causas. No caso brasileiro, o CENIPA é o órgão responsável pelo acompanhamento de acidentes e realiza anualmente a produção de estatísticas.

Dentre as várias possibilidades, a aviação geral foi escolhida como referência para o índice de acidentes, por ser composta por aeronaves pequenas e de relativo baixo custo, mais próximas dos VANTs pequenos do que aeronaves de transporte. Verificamos alguns documentos do CENIPA e apresentamos na Figura 3-6 alguns dos fatores contribuintes.

A Figura 3-6 e a Figura 3-7 apresentam diversos fatores contribuintes para os acidentes. Na primeira, podemos observar que os fatores contribuintes advêm inicialmente daqueles relacionados ao piloto, depois às condições meteorológicas e operacionais (manutenção e treinamento). Se somarmos as questões de condições de saúde da aeronave às de pilotagem, veremos que ambas respondem por quase a totalidade dos acidentes (Figura 3-7).

Figura 3-6– Fatores contribuintes para os acidentes ocorridos na aviação geral entre 2003 e 2012.
(CENIPA, 2013), pg 26.

Figura 3-7– Estatística para os acidentes ocorridos na aviação geral entre 2003 e 2012 por tipo de evento. CFIT é o acrônimo para *Controlled Flight Into Terrain*. (CENIPA, 2013), pg 26.

Obviamente, condições adversas e inusitadas acontecem a todo o momento e pilotos e controladores estão treinados para responderem de forma eficiente e eficaz para evitar acidentes. E o que acontece quando o piloto e controlador não identificam uma situação de risco rápido o suficiente? No caso dos VANTs, os pilotos têm percepção restrita, às vezes errônea, do meio ambiente e da situação real da aeronave.

Um exemplo de acidente com causas adversas e de enormes proporções ocorreu no Brasil com uma aeronave da operadora Air France, veja Figura 3-8. A análise do acidente aponta para erros de interpretação dos dados dos instrumentos, inconsistentes devido às condições atmosféricas. Neste caso em particular, poder-se-ia afirmar que a origem primária do acidente foi falha no acompanhamento das condições dos sistemas da aeronave, pois em acordo com o relatório final de acidente o tubo de pitot da aeronave indicou dados de velocidade errôneos (formação de gelo) e os pilotos não perceberam a discrepância destes dados com os de outros sistemas a tempo. (BEA, 2011)

Figura 3-8– Acidente do voo Air France 447.
Foto extraída do site <http://noticias.sapo.mz/info/artigo/1152883.html>.

Tendo em conta os dados do CENIPA, Figura 3-6 e Figura 3-7, pode-se afirmar que uma adaptação às novas condições de voo e uma correta interpretação de dados (que devem obviamente estar disponibilizados) são essenciais à sobrevivência em caso de uma situação adversa. No caso específico das colisões em voo, existem procedimentos e serviços estabelecidos em função da distância e rota, mas mesmo estas dependem da situação momentânea.

Para evitar colisões em voo, existem vários serviços usados em razão direta com a separação e rota de duas aeronaves, conforme Figura 3-9. Os serviços de separação proporcionados pelos órgãos de controle posicionam as aeronaves em função de suas características operacionais, localidade, tipo e fase de voo. Caso haja uma aproximação que represente risco de acidente, ou seja, os aviões estão mais próximos do que deveriam e em rota de colisão, sistemas embarcados entram em ação e recomendam aos pilotos ou atuam nos comandos para evitar o choque. Se a aproximação for mais crítica (mais próxima), sistemas especializados entram em ação para evitar a colisão em voo. Em aeronaves pilotadas, os pilotos são a última barreira à tragédia, mas, para isto, assume-se que eles estão

frequentemente observando o mundo externo a procura de possíveis ameaças. Em VANTs, os pilotos em terra podem ajudar neste sentido, mas existe uma tendência ao uso de sistemas sensores especializados chamados de *Sense and Avoidance* (S&A) para esta finalidade. Para VANTs pequenos, a necessidade de uso de sistemas S&A é um problema devido às restrições de massa, volume, energia e orçamento financeiro destas plataformas. Para estes últimos, é necessário encontrar soluções criativas e adaptadas ao seu ambiente operacional particular.

Figura 3-9– Serviços proporcionados para evitar colisões em voo. Adaptado de (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013)

Tendo sido feita uma verificação do ambiente e condições envolvidas em um acidente aeronáutico com aeronave tripulada, cabe verificar a realidade dos aviões sem pilotos embarcados.

3.3.2. ACIDENTES AERONÁUTICOS COM VANTs

Apesar de não levarem pessoas a bordo, acidentes envolvendo aeronaves não tripuladas têm o potencial de causar a perda de vidas humanas e prejuízos financeiros. Afinal, eles podem vir ao solo descontroladamente e atingir pessoas e instalações e colidir com aeronaves em voo.

Sem a flexibilidade e capacidade de adaptação de um ser humano a bordo, os VANTs podem ser ainda mais sujeitos a acidentes em condições adversas (WILLIAMS, 2004). Os sistemas eletrônicos embarcados, que efetivamente pilotam a aeronave, foram projetados tendo em conta determinado envelope de voo e com dados limitados das condições da aeronave e do ambiente externo. Apesar da velocidade de processamento da máquina ser bastante superior a de um piloto, a falta deste a bordo a torna mais sujeita a acidentes, pois, além da capacidade de adaptação, o ser humano tem a sua própria rede de sensores o que ajuda na identificação de condições de voo em adição àqueles da máquina.

Uma forma de tornar os VANTs mais robustos às condições adversas seria então aliar flexibilidade na malha de controle e sensores adicionais. Pilotos no chão possuem apenas a visão como sensor na pilotagem e pensar que ele realiza as suas tarefas na mesma qualidade pode ser um erro grave. A bordo, eles podem cheirar, ouvir, sentir e mesmo ver seu ambiente interno e externo, além, como já frisamos, acompanhar os dados sobre a saúde de seu avião no painel de instrumentos.

Da mesma forma que nas aeronaves tripuladas, acidentes com VANTs ocorrem não somente por conta de falta de identificação precoce de falhas nos sistemas da aeronave e condições externas adversas, mas também por falha nos procedimentos de operação. Quando os pilotos estão a bordo das aeronaves, existe um cuidado maior em baixa altura, com a velocidade de voo e com as condições meteorológicas. Com os pilotos no chão, existe uma tendência natural de ultrapassar certos limites operacionais e maior relaxamento na observação das condições ambientais. Mais treinamento, maior padronização na operação e um projeto mais adaptado à situação e ambiente operacional poderiam, por exemplo, ter evitado a enorme perda de VANTs que os EUA e o Reino Unido sofreram durante os combates no Afeganistão e Iraque, (WILLIAMS, 2004) e (THE GUARDIAN, 2013).

Os dados sobre acidentes reportados por (WILLIAMS, 2004) mostram a importância percentual dos fatores humanos como causa de acidentes, Figura 3-10. A Tabela 3-1 e a Tabela 3-2, assim como a Figura 3-11 e a Figura 3-12, mostram que estes são causa primária

dos problemas, apesar de estarem no *loop* de comando e terem informações e treinamento adequado. Notem que as aeronaves que constam destas Tabelas pertenciam às Forças Armadas dos EUA, particularmente rigorosas em seus procedimentos operacionais.

a)

b)

c)

d)

Figura 3-10– VANTs operados pelas Forças Armadas dos EUA cujas causas de acidentes estão reportadas por (WILLIAMS, 2004). a) Hunter (<http://www.northropgrumman.com/>); b) Shadow e c) Pioneer (www.aaicorp.com); d) Predator (<http://www.ga.com/>).

Tabela 3-1. Causas de acidentes envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).

	Hunter		Shadow		Pioneer		Predator	
Manutenção	4	10%	2	7%	5	2%	2	13%
Fatores Humanos	17	44%	5	19%	68	28%	8	53%
Aeronave	16	41%	10	37%	156	65%	5	33%
Sistema de Pouso Automático			6	22%				
Inimigo					5	2%		
Desconhecido	2	5%	4	15%	5	2%		
TOTAL	39		27		239		15

Figura 3-11– Causas de acidentes envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).

Tabela 3-2. Composição dos Fatores Humanos envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).

	Hunter		Shadow		Pioneer		Predator	
Tripulação	1	6%	2	25%	9	13%		
Alerta e alarmes	2	12%	2	25%			1	10%
Design do monitor	1	6%	2	25%			2	20%
Erro no pouso	7	41%			46	68%	1	10%
Erro na decolagem	3	18%			7	10%		
Erro de procedimento	3	18%	2	25%			6	60%
Meteorologia					6	9%		
TOTAL	17		8		68		10

Figura 3-12– Composição dos Fatores Humanos envolvendo os VANTs Hunter, Shadow, Pioneer e Predator operados pelos EUA, (WILLIAMS, 2004).

Durante os conflitos no Afeganistão, o Reino Unido perdeu um total de 450 VANTs devido a erros de pilotagem, falhas mecânicas e pouso forçado em território hostil. Deste total, tem-se 1 *Reaper* (o único armado, custo: 10M libras), 9 *Hermes 450* (metade da frota, custo: 1M libras cada), 412 *Desert Hawk* (lançado com as mãos) e 25 *Black Hornet* e *Tarantula Hawk*. Apesar do valor operacional destas aeronaves (evitam exposição de vidas ao perigo), os prejuízos e o índice de acidentes são alarmantes. De acordo com a reportagem do “The Guardian”, os *Hermes 450* acumularam 7.500 horas e os *Desert Hawk* realizaram mais de 30 mil missões. Estes números nos levam a um acidente de *Hermes 450* a cada 833 horas e um acidente a cada 56 horas no caso do *Desert Hawk*. Para este último, consideramos que uma missão típica de uma aeronave desta classe fica entre 30 e 60 minutos (45 na média). A Figura 3-13 traz fotos dos VANTs do Reino Unido mencionados na reportagem do “The Guardian”. A quantidade de acidentes e os valores das aeronaves, por si só, mostram que há muito que se fazer para tornar os VANTs mais confiáveis e mais sustentáveis em seu ciclo de vida.

a)

b)

c)

d)

e)

Figura 3-13— O Reino Unido perdeu 450 VANTs nos conflitos do Afeganistão e Iraque devido a erros de pilotagem, falhas mecânicas e pousos de emergência em território hostil: a) 1 *Reaper*; b) 9 *Hermes 450*; c) 412 *Desert Hawk*; 25 *Black Hornet* e *Tarantula Hawk* (d e e, respectivamente). (THE GUARDIAN, 2013)

3.3.3. *ACEITAÇÃO DE RISCO NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA*

Não existe obviamente risco nulo na operação de uma aeronave, o que se busca é a manutenção de índices baixos o suficientes para sua aceitação e a busca incessante por sua redução contínua. Assim, o objetivo é tornar a probabilidade de acidentes com VANTs menor do que as da aviação geral, tomada como referência, para facilitar a sua integração no espaço aéreo.

O índice de acidentes da aviação geral em 2012 foi de $6,78.10^{-5}$ (NTSB, NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD, 2013) e a FAA tem como objetivo um índice de acidentes fatais menor que 1,06 acidentes fatais por 100 mil horas de voo, $1,06.10^{-5}$, em 2013 (FAA, 2013). A dificuldade atual na busca por índices menores recai exatamente no sucesso das medidas anteriores, pois, com tão poucos acidentes, existem poucos dados para balizar as medidas adicionais. Usa-se atualmente situações descritas como de perigo e sua projeção para substituir a falta de acidentes, (FAA, 2013).

A FAA define perigo como uma condição que possa dar origem a um evento não planejado ou indesejado, como um acidente, por exemplo (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2009). A capacidade de identificação de uma situação como tendo potencial para gerar uma condição de perigo vem da experiência, treinamento e da observação atenta. Para tomar as decisões corretas no tempo certo, um piloto de uma aeronave tripulada é treinado para estar atento, reconhecer e agir a situações perigosas e ele usa seus 5 sentidos para realizar este monitoramento constante. Ele deve inspecionar constantemente os instrumentos que contém dados sobre a saúde da máquina, ambiente externo e navegação e fatores que diminuam esta capacidade são considerados de perigo. A incerteza dos resultados de uma situação de perigo está associada ao conceito de risco.

Risco é definido pela FAA como o resultado de uma condição de perigo que não é controlada ou eliminada, (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2009). Como um mesmo evento pode provocar situações bastante diversas, dependendo da aeronave, piloto e

condições gerais ao redor da aeronave, o conceito de risco está intimamente ligado ao de incerteza e seu gerenciamento é imperativo na avaliação das alternativas. Os conceitos de condição de perigo e de risco são os elementos constitutivos do gerenciamento de risco.

O fator humano é predominante em suas ocorrências, sendo responsável por impressionantes três em cada quatro acidentes aeronáuticos. Verifique o que está registrado no manual de gerenciamento de risco da FAA (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2009), página 2-1:

“The human element is the most flexible, adaptable, and valuable part of the aviation system, but it is also the most vulnerable to influences that can adversely affect its performance.” (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2009).

O fator humano é a mais flexível, adaptável e preciosa parte do sistema de aviação, mas é também o mais vulnerável a influências que podem afetar seu desempenho de forma adversa.

Um sistema capaz de, ao mesmo tempo, ser flexível, adaptável e pouco vulnerável a influências que provoquem variações nas incertezas resultantes de situações de perigo pode ser o Santo Graal para os voos autônomos. No entanto, é essencial manter o foco nas regulamentações e nas lições aprendidas pela aviação até hoje como forma de direcionar os esforços.

Com estes aprendizados do passado em conta, trazemos um dos elementos que ajudam o piloto na identificação de perigos e mitigação de riscos. Ele vem na forma de um acrônimo usado no planejamento da missão: *PAVE*. *PAVE* em inglês vêm das seguintes palavras: *Pilot-in-command*, *Aircraft*, *EnVironment* e *External pressures*. (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2009)

O uso do *PAVE* é assessório e serve à identificação de riscos e consequente tomada de decisões. O “P” serve para uma avaliação do estado geral dos pilotos no que se refere ao

estado físico, mental e emocional, pois estes afetarão diretamente não somente a sua capacidade de percepção de situações, como também a escolha das ações corretas. O “A” se refere às condições da máquina, sua saúde e desempenho. O “V” incorpora tudo o que se refere ao ambiente em que a aeronave está imersa, como condições atmosféricas, tráfego aéreo, terreno sobrevoado, locais de pouso e decolagem e auxílios à navegação. Finalmente, o “E” traz consigo a dinâmica envolvida na interação dos três primeiros elementos do PAVE, pois é preciso avaliar o peso cada um dos fatores na situação momentânea do voo para uma correta avaliação dos riscos. (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2009)

Uma avaliação dos riscos envolve primariamente o uso de uma matriz chamada de avaliação risco. A matriz de avaliação de risco possui em um de seus eixos a probabilidade de ocorrência de uma dada situação e, no outro, a severidade ou consequências de um evento. A probabilidade é normalmente qualificada como: Provável (ocorre muitas vezes), Ocasional (deve ocorrer algumas vezes), Remota (possível, mas difícil que ocorra) ou Improvável (muito improvável que ocorra). A severidade de um evento está ligada ao que pode ocorrer com pessoas e com a máquina e pode ser descrita como: Catastrófica (provoca fatalidades ou perda total), Crítica (ferimentos graves ou grandes danos), Marginal (ferimentos ou danos leves) ou Negligenciável (ferimentos ou danos menos que leves). A Tabela 3-3 mostra de forma pictórica uma matriz de avaliação de risco que pode ser usada no processo de tomada de decisão, fator este fundamental na gerência de risco.

Tabela 3-3. Exemplo de matriz de avaliação de risco.

		Severidade			
		Negligenciável	Marginal	Crítica	Catastrófica
Probabilidade	Improvável	Baixo	Médio	Médio	Médio
	Remota	Baixo	Médio	Médio	Sério
	Ocasional	Baixo	Médio	Sério	Alto
	Provável	Médio	Sério	Alto	Alto

3.4 Aeronavegabilidade e Regulamentos Associados

Neste item são definidos conceitos ligados à segurança de voo. As referências usadas foram as da FAA (*Federal Aviation Administration*), pois regulamentos semelhantes são publicados pela EASA (*European Aviation Safety Agency*) e ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil).

De acordo com o regulamento 14CFR (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2015), ser **aeronavegável** (*airworthy*) significa que a aeronave está conforme com o seu projeto de tipo e está em uma condição de operação segura (*airworthy means the aircraft conforms to its type design and is in a condition for safe operation*). Para a comprovação de operação segura, diversas técnicas podem ser aplicadas e existem normativas específicas a este respeito que devem ser atendidas (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 1988).

A FAA não impõe práticas específicas para a comprovação de aeronavegabilidade, mas circulares que reconhecem meios aceitáveis de desenvolvimento e certificação de uma aeronave. Um documento que traz práticas reconhecidas para o processo de garantia de desenvolvimento de aeronaves é a *Aerospace Recommended Practice* (ARP) 4754A (SAE AEROSPACE, 2010). A ARP 4754A documenta o processo que pode ser usado durante a

definição de requisitos, conforme Figura 3-14. Nesta mesma Figura, a ARP 4761 (SAE AEROSPACE, 2015) é indicada como referência para a avaliação de segurança dentro do contexto da ARP 4754A.

Na ARP 4761, dentre outras, as seguintes técnicas tradicionais de análise de segurança são mencionadas: Análise de Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis*, FTA), Modos de Falha e Análise de Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis*, FMEA) e Síntese de Modos de Falha e Efeitos (*Failure Modes and Effects Summary*, FMES). De forma sintética, estas técnicas dividem o sistema em suas partes (subsistemas) e realizam uma análise de consequências para a segurança da aeronave em caso de falha.

As técnicas de análise de risco tradicionais assumem que acidentes são causados por falhas de componentes. De fato, esta era a causa principal causa de acidentes em sistemas antigos, o que levou as técnicas de análise de risco e de projeto de segurança à busca de componentes críticos para diminuir a sua probabilidade de falha ou incluindo redundâncias.

Estas abordagens possuem algumas limitações devido ao fato que erros de software e falhas na tomada de decisão humana não são aleatórias. Por esta razão, técnicas de análise de risco como FTA e FMEA são menos eficazes para estes casos e para suplantar esta limitação, a segurança deve ser considerada desde o início do projeto. Desta forma, requisitos de segurança são considerados durante o projeto para influenciar a arquitetura do sistema como um todo, não após o projeto pronto com a verificação da susceptibilidade às falhas de componentes.

Assim, as técnicas tradicionais evoluíram e melhoraram a segurança aérea, mas têm deixado lacunas em sistemas complexos, aqueles em que existe maior dependência de softwares para a tomada de decisão. A complexidade e automação tornaram a análise por subsistemas passível de erro ao desconsiderar diversos elementos envolvidos na operação da aeronave. O STPA entende segurança como um problema de controle dinâmico, não como um problema de falha de componente. No próximo capítulo, a técnica STPA (*System*

Theoretic Process Analysis) será apresentada e usada para definição de requisitos de alto nível para garantir a segurança de voo.

Figura 3-14 – Orientação normativa para desenvolvimento e operação de aeronaves. (SAE AEROSPACE, 2010)

3.5 Conceitos Preliminares sobre Consciência Situacional

O tema consciência situacional (CS) tem sido explorado em diversos campos do conhecimento humano e, no caso dos VANTS, tem sido explorado devido à necessidade de acompanhamento das condições da aeronave e do ambiente em que estão inseridas para eventuais ações corretivas ou mitigadoras. Esta CS pode estar centrada nos pilotos, nos comandantes de missão ou na própria aeronave, conforme representado na Figura 3-15.

No capítulo 2, veremos na revisão da literatura que diversos trabalhos foram realizados para aumento da CS de pilotos e de comandantes de situação, mas esta tese inova ao trazer a atenção para a aeronave e focando especificamente a segurança de voo. Neste item, apresentaremos os conceitos que permitem uma compreensão de consciência situacional em voo, iniciando de forma mais geral para depois a levarmos para bordo da aeronave.

Figura 3-15– A consciência situacional pode ser explorada com diversos enfoques: Piloto do VANT, Comandante do Centro de Controle de Missão ou Aeronave.

Para iniciarmos a busca por um entendimento do que é CS, utilizaremos a definição de Endsley:

"Percepção dos elementos no ambiente dentro de um volume de tempo e espaço, compreensão do seu significado e projeção de sua condição no futuro próximo". (ENDSLEY, 1988)

Em outro trabalho, visando alcançar a consciência situacional em sistemas dinâmicos, Endsley (ENDSLEY, 1995) define três níveis de processos para definir as ações necessárias, veja a Figura 3-16. Nesta, observamos que dados de fontes internas e externas são coletados (nível 1) e usados em um algoritmo desenvolvido e adaptado a uma situação específica para

definir uma situação atual (nível 2) e, assim, projetar as ações consideradas melhores naquela situação (nível 3), Figura 3-16:

- Nível 1 - Percepção de elementos internos e externos: Eventos e sintomas.
- Nível 2 - Compreensão de seu significado: Cruzamento de informações obtidas dos sensores com a base de dados interna e com o objetivo da missão.
- Nível 3 - Projeção do seu estado em um futuro próximo: Consequências para a segurança e cumprimento da missão para definir e executar as ações.

Figura 3-16– Consciência Situacional exige a compreensão de diversos dados em uma ordem coerente para a tomada de decisão. Adaptado de (ENDSLEY, 1995).

A CS cria um processo para o estabelecimento de ações coerentes e em sintonia com a situação presente. Inicia coletando dados específicos para um momento particular, processa as informações obtidas de forma a criar um quadro de entendimento da situação momentânea e estabelece ações em uma ordem coerente.

A CS exige a compreensão de uma série de dados de diferentes origens. Uma aeronave em voo, com ou sem piloto a bordo, está imersa em diversos sistemas diferentes e com as mais diversas ligações e interdependências. Os sistemas internos ao avião garantem o voo, mas também recebem e enviam dados a entidades externas (para o controle de voo, solo e outras aeronaves em voo), seus movimentos no ar afetam a rota de outras aeronaves no presente e no futuro, ocorrências no solo como incêndios ou vulcões podem afetar o voo no formato em que havia sido programado. Obviamente as ações decorrentes do processamento dos dados (nível 3) dependerá da situação momentânea em que o avião está imerso (nível 1) e do entendimento que se faz dos dados (nível 2).

A Figura 3-17 busca iniciar a adaptação dos conceitos de CS de Endsley (ENDSLEY, 1995) para serem usados embarcados em VANTs. Nesta figura, temos definido um processo em que a partir de um evento iniciador, uma sequência de passos é dada para a execução de ações que evitem ou mitiguem um acidente aéreo. No nível 1, usamos dados de sensores diversos como base de um algoritmo para identificar eventos e sintomas. Da mesma forma que um médico identifica possíveis problemas de saúde em seus pacientes, a fusão e compreensão dos dados dos sensores (eventos) permitem estabelecer problemas o mais rápido possível e antes que estes se tornem demasiado graves e a segurança da aeronave esteja comprometida. No nível 2, usando os sintomas, algoritmos baseados em uma árvore de decisão podem calcular a gravidade do evento e a probabilidade de ocorrência de riscos à segurança de voo para, finalmente definir e realizar as ações necessárias (nível 3).

Figura 3-17– Processo sequencial para evitar ou mitigar acidentes com o Vant.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os conceitos essenciais sobre Veículos Aéreos Não Tripulados, sobre o ambiente aeronáutico em que estão inseridos e sobre consciência situacional. Vimos que uma série de fatores advindos das mais diversas fontes contribui para um acidente aéreo e também que os VANTs devem buscar estar em acordo com a legislação e padrões vigentes para a aviação tripulada.

O próximo capítulo define os requisitos de segurança de alto nível através da metodologia STPA e verifica de que forma um sistema embarcado poderia colaborar.

4 Determinação de Requisitos de Segurança

Este capítulo apresenta os requisitos de alto nível para aumento de segurança de voo de VANTs por meio da aplicação da metodologia *System Theoretic Process Analysis* (STPA). (LEVESON, 2012) e (LEVESON, 2015)

A metodologia STPA vem sendo desenvolvida como opção às metodologias tradicionais *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA) e *Fault Tree Analysis* (FTA), descritas neste Capítulo. O STPA aborda de forma mais completa a relação entre os diferentes elementos do sistema aéreo um vez que inclui fatores humanos, de hardware, software e tomada de decisão, não somente na análise de uma cadeia de eventos que provocam um acidente, como FMEA e FTA. O STPA é uma metodologia de análise de perigos e risco (*Hazard Analysis*) baseada na teoria de sistemas e criada para ser aplicada em ambientes com requisitos de segurança demandantes e grande conteúdo de software. (STAMATIS, 2003), (BROOKE e PAIGE, 2003) e (YU, YANG, *et al.*, 2011)

O STPA investiga os acidentes possíveis de forma sistêmica e durante o desenvolvimento do projeto. Desta forma, esta abordagem permite criar os requisitos para as etapas iniciais do desenvolvimento de um sistema. As metodologias tradicionais, FMEA e FTA, são úteis no desenvolvimento do projeto detalhado e serão empregadas no Capítulo 8, mas analisam a susceptibilidade às falhas dos componentes após o término das fases iniciais do projeto e na forma de uma cadeia de eventos. O FMEA possui uma abordagem *bottom-up* e é usado em controle de qualidade e determinação de confiabilidade. O FTA possui uma abordagem *top-down* e é usado para analisar consequências de certas falhas. No STPA, cenários que levam aos acidentes geram requisitos com parâmetros controlados através de malhas de controle específicas para eliminar as situações de risco apontadas.

O STPA possui uma formatação *top-down*, no sentido em que se inicia em alto nível e provoca definições de baixo nível durante o desenrolar do projeto. Os requisitos de alto nível são definidos a partir da identificação dos acidentes e perigos passíveis de ocorrer durante a

operação. Estes requisitos gerados permitem a definição de uma estrutura de controle para definir o sistema e/ou a operação. A partir desta malha de controle, são identificadas aquelas ações e cenários que podem levar a um acidente. A identificação destas ações e cenários fornece a base para a definição de requisitos, arquitetura e componentes do projeto.

Este capítulo apresenta os requisitos de segurança de alto nível através da metodologia STPA e verifica de que forma um sistema embarcado poderia colaborar com a melhoria da segurança nas operações de voo.

4.1 Metodologias Tradicionais: Cadeia de Falhas e Modelos de Causalidade

Este item descreve as diferenças de abordagem das metodologias de análise de falhas baseadas em cadeia de eventos em relação à do STPA. Este trabalho adota a STPA para desenvolver requisitos do sistema de segurança do sistema de embarcado de voo e se torna interessante ressaltar as diferenças da STPA com os métodos de análise de confiabilidade baseado em cadeia de eventos de falhas.

Os métodos de análise de falhas e confiabilidade de sistemas vêm sendo desenvolvidos desde a década de 30 em paralelo com o desenvolvimento tecnológico e o melhor entendimento da participação humana, (HEINRICH, 1931) e (REASON, 1990). Os sistemas são descritos através de suas partes e eventos que possam causar falhas são descritos de forma a identificar uma cadeia de ocorrências que, se combinadas, levariam a uma falha catastrófica. Esta sistemática faz sentido quando se entende os diferentes elementos que compõe a operação do sistema e se estabelece uma probabilidade de ocorrência de falha a cada um deles. Por exemplo, a falha de um técnico de manutenção na correção de um problema no rádio de uma aeronave pode levar à sua falha em voo e consequente perda de controle durante a operação. O correto estabelecimento de procedimentos de manutenção, a troca do rádio em momento adequado (em razão de falha identificada ou preventiva) e procedimentos em caso de falha de comunicação poderiam impedir a perda de controle. A

ocorrência de um dos eventos isolados não provocaria um acidente, somente a ocorrência de uma sequência.

O tratamento de possíveis acidentes como uma série de eventos isolados é usual na análise de riscos e é tradicionalmente descrita em forma de um queijo suíço, (REASON, 1990). A Figura 4-1 descreve eventos em forma de fatias de queijo suíço, onde seus buracos representam possíveis falhas. Faz sentido imaginar que se houver um alinhamento temporal de erros em cada um dos elementos que compõe a operação do sistema em estudo (buracos das fatias), uma falha catastrófica poderá ocorrer. Desta forma, os esforços têm sido no sentido de quantificar cada um dos eventos em forma probabilística e criar barreiras de contenção entre eles, isto é, mesmo se ocorrer uma falha em uma determinada parte da operação ou sistema, não ocorrerá a sua propagação. No exemplo do rádio usado, poder-se-ia usar um sistema de comunicação redundante, por exemplo, de forma que seria improvável a ocorrência de falha em dois rádios ao mesmo tempo.

Figura 4-1– Cadeia causal de eventos descrito em forma do alinhamento dos buracos em fatias de um queijo suíço.

O problema com o modelamento de susceptibilidade a falhas através do modelo de queijo suíço surge com o aumento da complexidade do sistema e a inter-relação entre os eventos. Na medida em que o desenvolvimento tecnológico tornou os sistemas mais autônomos, o ser humano passou a ocupar a posição de supervisor da operação de softwares e a independência dos eventos se torna cada vez menor. No exemplo dos rádios, se houver um compartilhamento lógico da entrada de dados digitais, a falha nesta pode provocar erros em ambos, mesmo que isoladamente estejam funcionando corretamente. A maior complexidade dos sistemas torna menor a independência dos sistemas e o maior conteúdo de software permite um funcionamento perfeito dos sistemas, desde que os requisitos estejam corretamente identificados e os dados de entrada conforme previsto.

Técnicas como FMEA e FTA assumem riscos probabilísticos a cada evento e se baseiam em falhas de componentes. As técnicas de análise e de projeto se baseiam em falhas isoladas e relativamente independentes, tornando-as passíveis de análise por teorias de confiabilidade. Sistemas baseados em hardware e com interações simples entre os elementos envolvidos em sua operação tornam válida a abordagem.

O STPA se torna mais interessante na medida em que o sistema em análise possui maior conteúdo de software e requisitos de segurança mais importantes, pois se torna mais difícil isolar os eventos ou identificar barreiras de contenção para a propagação de falhas. A falha de componentes se torna secundária na medida em que a interação entre componentes do sistema se torna o fator preponderante em seu funcionamento, pois, neste caso, a divisão de possíveis eventos em forma de fatias se torna difícil. Na mesma medida, a modificação do papel do humano de operador para supervisor torna mais difícil o modelamento em forma estatística, pois os erros dependem de decisões cognitivas complexas intrinsicamente ligadas ao contexto em que ocorrem. (DEKKER, 2002)

Este trabalho não irá definir um sistema embarcado para aumentar a segurança de voo, somente criar as bases e os conceitos para que isto seja feito em um trabalho futuro.

4.2 Análise STPA da Operação de VANTs

Este item utiliza a metodologia STPA para a definição de requisitos de segurança na operação de VANTs.

4.2.1. ACIDENTES E PERIGOS EM NÍVEL DE SISTEMA

Seguindo a metodologia STPA, este item identifica os acidentes e perigos na operação de um VANT. O VANT é encarado como um sistema, conforme descrito na Figura 3-1, sem considerar a possibilidade de uma segunda aeronave atuar como relay de comunicação. O sistema VANT é composto pela aeronave, estação de terra e piloto inseridos em um ambiente complexo conforme Figura 3-3. Na operação de VANTs, as potenciais perdas (acidentes) e os perigos que levam a essas perdas são identificados a seguir.

Acidentes:

A-1: Pessoas feridas ou mortas pela aeronave;

A-2: Danos inaceitáveis a aeronave, objetos ou propriedades.

Perigos (*Hazards*):

H-1: Colisão em voo;

H-2: Pouso descontrolado no solo;

Os acidentes e perigos relacionados à operação de VANTs permite a definição de requisitos de alto nível. Estes, por sua vez, serão considerados na estrutura de controle da aeronave para posterior definição de requisitos.

4.2.2. IDENTIFICAÇÃO DA MALHA DE CONTROLE DO SISTEMA VANT

Neste item, duas malhas de controle serão definidas. A primeira se refere à estrutura hierárquica de indústria, isto é, apresenta a arquitetura de comando e fluxo de dados em que o objeto de estudo está inserido, veja. A segunda malha de controle é específica para a operação do VANT, veja Figura 4-3. Em ambas, as ações de controle são representadas pelas setas verticais no sentido de cima para baixo e os *feedbacks* são representados por setas verticais no sentido de baixo para cima.

Na estrutura hierárquica da indústria, Figura 4-2, os elementos de nível superior provêm leis, políticas, procedimentos e padrões aos inferiores e, em sentido inverso, são enviados os resultados destas instruções. Esta estrutura hierárquica visa reforçar as restrições de segurança e é mais gerencial. Nesta figura, à esquerda se observa o sistema para desenvolvimento e à direita para operação.

Um sistema VANT precisa considerar as questões de segurança em ambas as circunstâncias, desenvolvimento e operação, e ainda submeter os relatórios de forma a permitir melhorias nos procedimentos e legislação vigentes. Neste caso específico, no alto do ramo esquerdo da, a legislação federal é respeitada e normas específicas para funcionamento do sistema é realizado por órgão de governo setoriais, como a Agência de Aviação Civil (ANAC) e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). As instituições privadas e públicas que atuam no setor aeronáutico são obrigadas a respeitar as regras impostas, de certificação e operação, por exemplo, e determinam regras e padrões internos para desenvolverem os seus produtos de acordo com as regras superiores. Da mesma forma, os gerentes de cada projeto respeitam as regras de sua instituição. Assim, ao final, se requisitos de segurança e operação forem bem estabelecidos, os produtos gerados terão menores taxas de acidentes. As imperfeições notadas a cada nível podem ser enviadas ao nível superior em forma de solicitação para que haja a mudança de leis, políticas, procedimentos e padrões. O ramo direito da Figura 4-2 trata da operação e um entendimento análogo pode ser feito, só que, ao invés de voltado ao desenvolvimento do produto, tem-se a

operação do sistema. A ponte entre os dois ramos da Figura está na operação e manutenção do sistema, como pode ser verificado.

Figura 4-2– Estrutura hierárquica de controle de segurança para a indústria de VANTs.

A malha de controle da Figura 4-3 é composta pelos elementos envolvidos na operação da aeronave. Esta figura mostra de forma simplificada o fluxo de informações e comandos durante o voo, sendo que, a estação de controle e os sistemas da aeronave podem ser mais simples ou mais complexos em função dos objetivos da aeronave e da missão. Sistemas de navegação e comunicação, detecção de outras aeronaves e outros subsistemas podem estar ou não presentes. A sua complexidade pode variar em função de requisitos derivados da

missão a ser executada. Como os requisitos que serão definidos estarão em alto nível, tal nível de detalhamento foi desconsiderado neste trabalho. Na Figura 4-3, as setas contínuas representam ações de controle (cima para baixo) e de *feedback* (baixo para cima) e as tracejadas fluxo de informações.

Além de um comandante de missão (opcional), a operação do VANT requer o uso de dois pilotos, um humano e outro automatizado, o primeiro no solo e o segundo a bordo da aeronave. A partir da observação da Figura 4-3 e tendo em conta os Acidentes e Perigos identificados, pode-se definir os requisitos de mais alto nível. No entanto, considerando a obrigatoriedade da existência de dois pilotos, é importante definir de forma clara o papel previsto para o piloto automático. Segundo a FAA, (*FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION*, 2009): "um piloto automático é capaz de realizar muitas tarefas de forma intensiva, seu uso automatiza a pilotagem e a navegação, ajudando o piloto a manter o foco em aspectos como o status do avião e do voo".

A Tabela 4-1 apresenta ações que levam a situações de acidentes e perigos de quatro formas diferentes: não realizadas, feitas erroneamente, acionadas antes ou depois do tempo devido ou com duração equivocada (terminando muito cedo ou muito tardiamente em relação ao necessário). Como exemplo, pode-se verificar a primeira linha desta Tabela, item 1.1 onde são identificadas quatro ações de controle inseguras referentes à alteração dos parâmetros de voo (motor e atitude) quando próximo dos limites do envelope de velocidades permitidas, o que pode causar dano estrutural ou perda de controle por velocidade excessiva ou próxima do estol. Na primeira ação identificada, 1.1a.1., nada é feito quando o limite de velocidade é atingido. Na segunda ação, 1.1b.1., um comando errôneo é enviado e agrava a situação acelerando a situação de risco, por exemplo, aumenta-se ao invés de reduzir a potência do motor. Na terceira ação, 1.1c.1., existe um retardo excessivo no comando de correção, significa, por exemplo, que apesar do comando de redução de potência para diminuir a velocidade da aeronave ter sido correto, ele demorou e tornou possível um dano estrutural e um eventual perda de controle. Na quarta ação insegura, 1.1d.1., o comando foi correto, mas

foi interrompido prematuramente. No caso da velocidade excessiva, significa que o comando de diminuição de potência dos motores foi encerrado antes da aeronave sair do limite de velocidade. Raciocínio semelhante foi usado nas demais linhas desta Tabela de forma a identificar as ações inseguras na operação do VANT.

Figura 4-3– Estrutura de Controle do Sistema VANT.

Tabela 4-1. Ações de Controle Inseguras.

Ação de controle (AC)	AC não realizada oferece risco/perigo	AC realizada oferece risco/perigo	AC realizada muito cedo, muito tarde ou fora de sequência oferece risco/perigo	AC interrompida muito cedo ou aplicada por muito tempo oferece risco/perigo* *aplicável somente a AC contínuas
1. Alterar parâmetros de voo	1.1a.1. Falta de alteração dos parâmetros de voo (motor e atitude) quando próximo dos limites do envelope de velocidades permitidas. <i>Rationale:</i> Voo com velocidade fora do envelope pode causar dano estrutural ou perda de controle(excessiva ou próxima do estol). H2	1.1b.1. Comando errôneo de alteração dos parâmetros de voo quando próximo dos limites do envelope de velocidades permitidas. H2	1.1c.1. Comando tardio de alteração dos parâmetros de voo quando próximo dos limites do envelope de velocidades permitidas.	1.1d.1. Interrupção do comando de alteração dos parâmetros de voo quando próximo dos limites do envelope de velocidades permitidas.
	1.2a.1. Falta de alteração de mudança de altitude. <i>Rationale:</i> Voo baixo pode provocar choque com terreno e voo acima do previsto pode exceder limite de envelope ou de legislação. H1, H2	1.2b.1. Comando errôneo de mudança de altitude.	1.2c.1. Comando tardio de mudança de altitude.	1.2d.1. Interrupção do comando para mudança de altitude
	1.3a.1. Falta de comando de desvio de outra aeronave. <i>Rationale:</i> Pode provocar choques no ar. H1.	1.3b.1. Comando errôneo de desvio de outra aeronave.	1.3c.1. Comando tardio de desvio de outra aeronave.	1.3d.1. Interrupção do comando de desvio de outra aeronave.
	1.4a.1. Falta de comando de desvio de sobrevoos de área de risco ou proibida. <i>Rationale:</i> Sobrevoos de área densamente povoada ou proibida pela legislação H1 e H2.	1.4b.1. Comando errôneo de desvio de sobrevoos de área de risco ou proibida	1.4c.1. Comando tardio de desvio de sobrevoos de área de risco ou proibida	1.4d.1. Interrupção do comando de desvio de sobrevoos de área de risco ou proibida
	1.5a.1. Falta de comando de desvio de tempestades. <i>Rationale:</i> Pode permitir voo em condições meteorológicas adversas. H2.	1.5b.1. Comando errôneo de desvio de tempestades.	1.5c.1. Comando tardio de desvio de tempestades.	1.5d.1. Interrupção de desvio de tempestades.
2. Abortar Missão	2.1a.1. Falta de comando de retorno à Base devido à falha de subsistema da aeronave. <i>Rationale:</i> Uma falha catastrófica pode ocasionar a perda de controle da aeronave. H2	2.1b.1. Comando errôneo de retorno à Base devido à falha de subsistema da aeronave.	2.1c.1. Comando tardio de retorno à Base devido à falha de subsistema da aeronave.	2.1d.1. Interrupção do comando de retorno à Base devido à falha de subsistema da aeronave.
	2.2a.1. Falta de comando de retorno à Base devido à piora das condições meteorológicas. <i>Rationale:</i> Pode provocar a perda de controle da aeronave. H2	2.2b.1. Comando errôneo de retorno à Base devido à piora das condições meteorológicas.	2.2c.1. Comando tardio de retorno à Base devido à piora das condições meteorológicas.	2.2d.1. Interrupção do comando de retorno à Base devido à piora das condições meteorológicas.
	2.3a.1. Falta de comando de retorno à Base devido à distância excessiva da mesma provoca perda de enlace rádio com a aeronave. <i>Rationale:</i> Pode provocar a	2.3b.1. Comando errôneo de retorno à Base devido à distância excessiva da mesma provoca perda de enlace rádio com a aeronave.	2.3c.1. Comando tardio de retorno à Base devido à distância excessiva da mesma provoca perda de enlace rádio com a aeronave.	

Ação de controle (AC)	AC não realizada oferece risco/perigo	AC realizada oferece risco/perigo	AC realizada muito cedo, muito tarde ou fora de sequência oferece risco/perigo	AC interrompida muito cedo ou aplicada por muito tempo oferece risco/perigo* *aplicável somente a AC contínuas
	perda de controle da aeronave. H1 e H2.			
3. Abortar Voo	3.1ª.1. Falta de comando de pouso imediato em emergência em situação iminente de perda de controle da aeronave. <i>Rationale:</i> Permite choque descontrolado com o solo em alta velocidade. H2	3.1b.1. Comando errôneo de comando de pouso imediato em emergência em situação iminente de perda de controle da aeronave. <i>Rationale:</i> Pouso em emergência é arriscado e pode provocar acidentes.	3.1c.1. Comando tardio de comando de pouso imediato em emergência em situação iminente de perda de controle da aeronave. R3.1.c.2 – O sistema deve ser evitar comandos precoces de pouso em emergência.	
	3.2a.1. Falta de comando de abertura de paraquedas em situação de perda de controle da aeronave. <i>Rationale:</i> Permite choque descontrolado com o solo em alta velocidade. H2	3.2b.1. Comando errôneo de abertura de paraquedas <i>Rationale:</i> Condições atmosféricas adversas podem levar a erro de interpretação e ventos fortes podem arrastar a aeronave no solo. H2	3.2c.1. Comando precoce de abertura de paraquedas com motor em funcionamento ou atitude errônea. R3.2.c.2 – O sistema deve ser evitar comandos tardios de abertura de paraquedas. <i>Rationale:</i> Pode ocorrer perda de controle e choque descontrolado com o solo.	

4.3 Requisitos de Segurança de Alto Nível

As ações de controle na Tabela 4-1 permitem identificar os cenários em que acidentes podem ocorrer devido ao processo de decisão do piloto em solo ou de forma autônoma pela aeronave. Visando impedir a ocorrência de situações perigosas, a Tabela 4-2 apresenta os requisitos de alto nível necessários para aumentar a segurança de voo de VANTs.

No exemplo usado no item 4.2, usou-se as ações inseguras referentes à manutenção do envelope de velocidades através do controle de potência do motor, *1.1a.1*, *1.1b.1*, *1.1c.1* e *1.1d.1*. Para evitar cada uma dessas ações, foi criado um requisito principal e dois derivados. A razão para dois requisitos derivados é a presença de dois controladores, um humano na estação de controle e outro eletrônico embarcado na aeronave (piloto automático, PA). No caso do exemplo de controle de velocidade, as formas de identificação da situação da aeronave e procedimentos e etapas exigidas para o caso da ação ser tomada pelo humano e pelo PA são muito diferentes. No caso humano, os dados de telemetria devem percorrer

diversas etapas na aeronave, serem enviadas por enlace rádio ao receptor da estação de terra, aparecerem de alguma forma no monitor disponível ao piloto, serem percebidas e interpretadas e as ações serem enviadas seguindo o caminho inverso. No caso do PA, os dados devem eventualmente percorrer barramentos e portas e serem tratadas por um software de tomada de decisão. Apesar de as ações exigidas ser semelhante, os requisitos para cada um dos casos diferem bastante.

Tabela 4-2. Requisitos de Alto Nível.

Ação de Controle	Requisito Principal	Requisito Derivado
[1.1a.1]	R1.1.a.1 – O sistema deve fornecer meios para que haja a identificação de velocidades próximas dos limites e a manutenção do envelope.	R1.1.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto identifique velocidades próximas dos limites e este esteja treinado para atuar e manter a aeronave no envelope. R1.1.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha a aeronave no envelope.
[1.1b.1]	R1.1.b.1 – O sistema deve fornecer meios para que haja ações corretas para manter a velocidade dentro dos limites previstos..	R1.1.b.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente na identificação das ações para manter a velocidade dentro dos limites previstos. R1.1.b.1ii – O sistema da aeronave devem fornecer meios para que o PA execute as ações corretas para manter a velocidade dentro dos limites previstos.
[1.1c.1]	R1.1.c.1 – O sistema deve fornecer meios para que ações ocorram no tempo certo para manter a velocidade dentro do envelope previsto.	R1.1.c.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente na identificação das ações para atuar antes que a aeronave exceda os limites previstos de velocidades. R1.1.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha uma TBD faixa de segurança de velocidades dentro do envelope previsto.
[1.1d.1]	R1.1.d.1 – O sistema deve fornecer meios para que a ação de manutenção das velocidades previstas não seja interrompida.	R1.1.d.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente e não interromper as ações para evitar que a aeronave exceda os limites previstos de velocidades. R1.1.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa a ação de manutenção das velocidades previstas.
[1.2a.1]	R1.2.a.1 – O sistema deve fornecer meios para que seja mantida uma altura mínima de TBD ft acima do terreno.	R1.2.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto identifique baixas altitudes e este esteja treinado para manter altitude de segurança mínima de TBD ft acima do terreno. R1.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha uma TBD ft acima do terreno.
[1.2b.1]	R1.2.b.1 – O sistema deve fornecer meios para que ações corretas mantenham a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno.	R1.2.b.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente na identificação das ações para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno. R1.2.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha as ações corretas para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno.

Ação de Controle	Requisito Principal	Requisito Derivado
[1.2c.1]	R1.2.c.1 – O sistema deve fornecer meios para que haja correções no tempo certo para manutenção da altitude mínima de TBD ft acima do terreno.	R1.2.c.1i – O piloto deve estar treinado para atuar comandar a correção de altura no tempo certo para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno. R1.2.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA comande correções no tempo certo e manter a altitude mínima de TBD ft acima do terreno.
[1.2d.1]	R1.2.d.1 – O sistema deve fornecer meios para que não haja interrupção das ações para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno.	R1.2.d.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente e não interromper as ações para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno. R1.2.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno.
[1.3a.1]	R1.3.a.1 – O sistema deve ser capaz de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que a realização de manobras para evitar colisões em voo.	R1.3.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto identifique aeronaves próximas e este esteja treinado para realizar manobras para evitar colisões em voo. R1.3.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que o PA realize manobras para evitar colisões em voo.
[1.3b.1]	R1.3.b.1 – O sistema deve ser capazes de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que a realização de manobras apropriadas para evitar colisões em voo.	R1.3.b.1i – O piloto deve estar treinado para realizar manobras para evitar colisões em voo. R1.3.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que o PA realize as manobras mais apropriadas para evitar colisões em voo.
[1.3c.1]	R1.3.c.1 – O sistema deve fornecer meios para que as manobras para evitar colisões em voo sejam realizadas no tempo certo.	R1.3.c.1i – O piloto deve estar treinado para realizar manobras no tempo certo para evitar colisões em voo. R1.3.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA realize manobras no tempo certo para evitar colisões em voo.
[1.3d.1]	R1.3.d.1 – O sistema deve fornecer meios para que não haja interrupção das ações para evitar colisões em voo.	R1.3.d.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente e não interromper as ações para evitar colisões em voo. R1.3.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para evitar colisões em voo.
[1.4a.1]	R1.4.a.1 – O sistema deve ser capaz de identificar área(s) de risco ou proibida(s) na rota de voo para que seu sobrevoo seja evitado.	R1.4.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto identifique área(s) de risco ou proibida(s) na rota de voo e evite seu sobrevoo. R1.4.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar área(s) de risco ou proibida(s) na rota de voo para que o PA evite seu sobrevoo.
[1.4b.1]	R1.4.b.1 – O sistema deve ser capaz de identificar aeronaves próximas e fornecer meios a realização de manobras apropriadas para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s).	R1.4.b.1i – O piloto deve estar treinado para realizar as manobras corretas para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s). R1.4.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que o PA realize as manobras mais apropriadas para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s).
[1.4c.1]	R1.4.c.1 – O sistema deve fornecer meios para que as manobras para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s) ocorram no tempo certo.	R1.4.c.1i – O piloto deve estar treinado para realizar manobras no tempo certo para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s). R1.4.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA realize manobras no tempo certo para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s).

Ação de Controle	Requisito Principal	Requisito Derivado
[1.4d.1]	R1.4.d.1 – O sistema deve fornecer meios para que não haja interrupção das ações para evitar o sobrevoos de área(s) de risco ou proibida(s).	R1.4.d.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente e não interromper as ações para evitar o sobrevoos de área(s) de risco ou proibida(s). R1.4.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para evitar o sobrevoos de área(s) de risco ou proibida(s).
[1.5a.1]	R1.5.a.1 – O sistema deve ser capaz de identificar condições meteorológicas adversas no voo para comandar ações que evitem riscos à segurança de voo.	R1.5.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto identifique condições meteorológicas adversas na rota de voo e evite riscos à segurança de voo. R1.5.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar condições meteorológicas adversas no voo para comandar ações ao PA que evitem riscos à segurança de voo.
[1.5b.1]	R1.5.b.1 – O sistema deve ser capaz de identificar e comandar as ações corretas para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados.	R1.5.b.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para identificar condições meteorológicas adversas na rota de voo e realizar as manobras corretas que mantenham a segurança de voo. R1.5.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar condições meteorológicas adversas no voo para comandar ações ao PA que mantenham a segurança de voo.
[1.5c.1]	R1.5.c.1 – O sistema deve fornecer meios para que manobras sejam realizadas no tempo certo para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados.	R1.5.c.1i – O piloto deve estar treinado para realizar manobras no tempo certo para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados. R1.5.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA realize manobras no tempo certo para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados.
[1.5d.1]	R1.5.d.1 – O sistema deve fornecer meios para que não haja interrupção nas ações para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados.	R1.5.d.1i – O piloto deve estar treinado para atuar corretamente e não interromper as ações para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados. R1.5.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados.
[2.1a.1]	R2.1.a.1 – O sistema deve ser capaz de identificar falha de subsistema da aeronave para comandar retorno à Base e evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave.	R2.1.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto identifique falha de subsistema da aeronave para comandar retorno à Base e evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave. R2.1.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar falha de subsistema da aeronave para comandar ações ao PA de retorno à Base e, assim, evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave.
[2.1b.1]	R2.1.b.1 – O sistema deve ser capaz de identificar falha de subsistema da aeronave para comandar corretamente o retorno à Base para evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave.	R2.1.b.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para identificar falha de subsistema da aeronave e comandar corretamente o retorno à Base e, assim, evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave. R2.1.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar falha de subsistema da aeronave para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base e, assim, evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave.
[2.1c.1]	R2.1.c.1 – O sistema deve ser capaz de identificar falha de subsistema da	R2.1.c.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para identificar falha de subsistema da aeronave no tempo

Ação de Controle	Requisito Principal	Requisito Derivado
	aeronave no tempo certo para comandar corretamente o retorno à Base antes de acontecer falha catastrófica e perda de controle da aeronave.	certo e comandar corretamente o retorno à Base antes de acontecer falha catastrófica e perda de controle da aeronave. R2.1.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar falha de subsistema da aeronave no tempo certo para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base antes de acontecer falha catastrófica e perda de controle da aeronave.
[2.1d.1]	R2.1.d.1 – O sistema não deve interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à falha de subsistema da aeronave.	R2.1.d.1i – O piloto não deve interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à falha de subsistema da aeronave. R2.1.d.1ii – Os sistemas da aeronave não devem interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à falha de subsistema da aeronave.
[2.2a.1]	R2.2.a.1 – O sistema deve ser capaz de identificar a piora das condições meteorológicas para comandar retorno à Base para evitar a perda de controle da aeronave.	R2.2.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto identifique a piora das condições meteorológicas para comandar retorno à Base para evitar a perda de controle da aeronave. R2.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar a piora das condições meteorológicas para comandar ações ao PA de retorno à Base e, assim, evitar a perda de controle da aeronave.
[2.2b.1]	R2.2.b.1 – O sistema deve ser capaz de identificar a piora das condições meteorológicas para comandar corretamente o retorno à Base para evitar perda de controle da aeronave.	R2.2.b.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para identificar a piora das condições meteorológicas e comandar corretamente o retorno à Base e, assim, evitar a perda de controle da aeronave. R2.2.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar a piora das condições meteorológicas para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base e, assim, evitar a perda de controle da aeronave.
[2.2c.1]	R2.2.c.1 – O sistema deve ser capaz de identificar a piora das condições meteorológicas no tempo certo para comandar corretamente o retorno à Base antes de acontecer a perda de controle da aeronave.	R2.2.c.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para identificar a piora das condições meteorológicas no tempo certo e comandar corretamente o retorno à Base antes de acontecer a perda de controle da aeronave. R2.2.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar a piora das condições meteorológicas no tempo certo para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base antes de acontecer a perda de controle da aeronave.
[2.2d.1]	R2.2.d.1 – O sistema não deve interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à piora das condições meteorológicas.	R2.2.d.1i – O piloto não deve interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à piora das condições meteorológicas. R2.2.d.1ii – Os sistemas da aeronave não devem interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à piora das condições meteorológicas.
[2.3a.1]	R2.3.a.1 – O sistema deve ser capaz de concluir que a distância da Base é excessiva e existe risco de perda de enlace rádio com a aeronave para comandar ação de retorno à Base.	R2.3.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto conclua que a distância excessiva da Base é excessiva e comandar o retorno à Base. R2.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar que a distância da Base é excessiva e comandar ações ao PA de retorno à Base.
[2.3b.1]	R2.3.b.1 – O sistema deve ser capaz de concluir que a distância da Base é excessiva e existe risco de perda de enlace rádio com a aeronave para comandar corretamente a ação de retorno à Base.	R2.3.b.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto conclua que a distância excessiva da Base é excessiva e comandar corretamente o retorno à Base. R2.3.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar que a distância da Base é excessiva e comandar ações ao PA de retorno à Base corretamente.

Ação de Controle	Requisito Principal	Requisito Derivado
[2.3c.1]	R2.3.c.1 – O sistema deve ser capaz de concluir que a distância da Base é excessiva e comandar a ação de retorno à Base antes de acontecer a perda de enlace rádio.	R2.3.c.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para concluir que a distância da Base é excessiva e comandar a ação de retorno à Base antes de acontecer a perda de enlace rádio. R2.3.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que a distância da Base é excessiva e o PA comandar a ação de retorno à Base antes de acontecer a perda de enlace rádio.
[3.1a.1]	3.1a1. Falta de comando de pouso imediato em emergência em situação iminente de perda de controle da aeronave. Rationale: Permite choque descontrolado com o solo em alta velocidade.	R3.1.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto conclua que o voo deve ser abortado para comandar o pouso em emergência. R3.1.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar o pouso em emergência.
[3.1b.1]	3.1b1. Comando errôneo de comando de pouso imediato em emergência em situação iminente de perda de controle da aeronave. Rationale: Pouso em emergência é arriscado e pode provocar acidentes. H2	R3.1.b.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto conclua que o voo deve ser abortado para comandar corretamente o pouso em emergência. R3.1.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar corretamente o pouso em emergência.
[3.1c.1]	3.1c1. Comando tardio de comando de pouso imediato em emergência em situação iminente de perda de controle da aeronave. Rationale: O atraso no comando pode permitir a ocorrência de perda de controle ou falha catastrófica. H2	R3.1.c.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para evitar comandos tardios de pouso em emergência que provoquem pouso descontrolado no solo. R3.1.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos tardios de pouso em emergência que provoquem pouso descontrolado no solo.
[3.1c.2]	R3.1.c.2 – O sistema deve ser evitar comandos precoces de pouso em emergência.	R3.1.c.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para evitar comandos precoces de pouso em emergência. R3.1.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos precoces de pouso em emergência.
[3.2a.1]	R3.2.a.1 – O sistema deve ser capaz de concluir que o voo deve ser abortado e comandar abertura de paraquedas.	R3.2.a.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto conclua que o voo deve ser abortado para comandar a abertura de paraquedas. R3.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar a abertura de paraquedas.
[3.2b.1]	R3.2.b.1 – O sistema deve ser capaz de concluir que o voo deve ser abortado e comandar corretamente a abertura de paraquedas.	R3.2.b.1i – A estação de terra deve prover meios para que o piloto conclua que o voo deve ser abortado para comandar corretamente a abertura de paraquedas. R3.2.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar corretamente a abertura de paraquedas.
[3.2c.1]	R3.2.c.1 – O sistema deve ser evitar comandos tardios de abertura de paraquedas que provoquem pouso descontrolado no solo.	R3.2.c.1i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para evitar comandos tardios de abertura de paraquedas que provoquem pouso descontrolado no solo. R3.2.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos tardios de abertura de paraquedas que provoquem pouso descontrolado no solo.
[3.2c.2]	R3.2.c.2 – O sistema deve ser evitar comandos precoces de abertura de paraquedas.	R3.2.c.2i – A estação de terra deve prover meios e o piloto treinado para evitar comandos precoces de abertura de paraquedas. R3.2.c.2ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos precoces de abertura de paraquedas.

4.4 IFA²S como consequência dos Requisitos de Segurança obtidos com uso do STPA

Este item visa discutir os requisitos gerados no item anterior. Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é o aumento da segurança de voo de VANTs, os requisitos gerados visaram identificar situações que podem potencialmente gerar situações de risco. Neste contexto, a tomada de decisão recai sobre o piloto humano ou sobre os sistemas da aeronave, enviando ordens ao piloto automático responsável pelo posicionamento e navegação.

Para comandar a aeronave, o piloto humano faz uso de uma série de interfaces e de condições preestabelecidas. A fonte de dados primária do piloto é a interface visual fornecida pela estação de terra. Nela, os dados da aeronave e da situação são apresentados para que o piloto humano envie as suas ordens via sistema de comunicações. Além dos dados de telemetria, informações sobre o tráfego aéreo e meteorologia, outras condições relevantes podem ser adicionadas à interface visual da estação ou comunicadas diretamente ao piloto em forma de áudio. Como condições técnicas, tem-se que considerar que os enlaces de comunicação estão em ordem e que a interface da estação de terra permite ao piloto identificar todas as situações estabelecidas nos requisitos. Estas condições podem ser auditadas e verificadas de forma a minimizar os riscos relevantes. Por outro lado, existem condições mais subjetivas e ligadas ao processo de decisão pessoal do piloto, seu estado psicológico e de atenção no momento de decisão, velocidade de decisão, experiência e, finalmente e não menos importante, a qualidade de seu treinamento. De qualquer forma, o piloto do VANT está privado de uma série de informações que estariam disponíveis a bordo e sujeito a diversas variáveis momentâneas e de difícil mensuração uma vez em solo. Estas condições técnicas e subjetivas se somam e tornam mais complexo o processo de garantia de segurança e mais difícil o controle das ações.

Para o atendimento dos requisitos, o processo de tomada de decisão autônomo recai sobre as ordens dadas ao piloto automático, a disponibilidade e qualidade de dados para alimentar o processo decisório e algoritmos criados para esta finalidade. Os VANTs atuais derivam da experiência acumulada em aeronaves tripuladas e carecem de substitutos à saída

do piloto do *cockpit*, conforme discutido nos Capítulos 1 e 2. A análise dos requisitos da Tabela 4-2 mostram a necessidade de processamento de dados variados e a tomada de decisão baseada nestas entradas, nas condições de contorno e nos objetivos a serem alcançados (evitar situações de risco). Neste caso, as aeronaves não tripuladas precisam incluir estas funções adicionais de processamento nos sistemas pré-existentes ou designar um sistema específico para esta fazê-lo, atualmente inexistente.

De forma geral, as funções apontadas na Tabela 4-2 divergem daquelas encontradas nos VANTs atuais. Existem algumas funções específicas implementadas por sistemas dedicados, como o desvio de aeronaves em risco de colisão, por exemplo, mas a implementação das ações de forma mais completa teria que ser adicionada a sistemas existente atualmente. Os candidatos naturais para receber estes algoritmos seriam o computador de bordo e o piloto automático. O primeiro, no entanto, é responsável pela gerência do fluxo de dados e dos subsistemas, enquanto o segundo possui o objetivo específico de realizar a navegação. Desta forma, funções adicionais de manutenção de segurança de voo no computador de bordo ou no piloto automático estão além da missão atribuída a ambos atualmente e poderiam comprometer as tarefas primárias. Uma solução possível seria então acrescentar um novo elemento voltado exclusivamente para manter distância de cenários de risco e tomar decisões que mitiguem situação de acidente potencial. Este novo elemento foi identificado como IFA²S, *In-Flight Awareness Augmentation System*.

O IFA²S pode ser projetado das formas mais variadas, seguindo restrições e objetivos dos VANTs em que serão embarcados. Conforme apresentado no Capítulo 3, os VANTs possuem diversos tamanhos e formas, executando missões em ambientes variados. Para permitir um quadro geral para o projeto de um IFA²S específico é que foi criado o modelo IFA, *In-Flight Awareness*.

Excetuando-se a presença do sistema IFA²S, a Figura 4-4 apresenta os diversos sistemas de aeronaves normalmente encontrados em aeronaves não tripuladas. O IFA²S recebe os dados dos subsistemas seja através de sensores internos ou provenientes do mundo

exterior e verifica constantemente a presença de situações de risco. Caso um dos requisitos de segurança estabelecidos seja violado, o IFA²S age de forma a evitar o mitigar a situação. Nota-se que as entradas e a saídas do IFA²S pode se dar através do PA ou diretamente nos sistemas da aeronave. Esta arquitetura visa permitir ações de controle mesmo no caso de uma falha no PA, mas implica que o IFA²S seja capaz de assumir as funções do PA, mesmo que de forma e tempo limitados. Algoritmos de decisão que respeitem os requisitos definidos na Tabela 4-2 precisam, desta forma, ser incorporados ao IFA²S.

Figura 4-4— Estrutura de Controle Interna do Sistema VANT proposta.

4.5 Conclusões

Este capítulo apresentou os requisitos de alto nível para aumento de segurança de voo de VANTs por meio da metodologia *System Theoretic Process Analysis* (STPA) como opção às tradicionais (FMEA e FTA). Através da consideração dos diferentes elementos do sistema aéreo, a análise de perigos e risco baseando-se na teoria de sistemas fez do STPA uma metodologia apropriada à definição de um sistema embarcado voltado à segurança de voo, pois foi criado para ser aplicada em ambientes com requisitos de segurança demandantes e grande conteúdo de software.

Este capítulo apresentou estruturas de controle sistêmicas e específicas do sistema VANT e estabeleceu requisitos de alto nível para os pilotos automático e humano a fim de evitar os perigos e acidentes identificados.

A diferença na estrutura de comando e de feedback necessária aos pilotos automático e humano, mostram as vantagens oferecidas pela existência de um sistema embarcado capaz de responder às situações de risco de acidentes. A partir desta análise de requisitos, o sistema embarcado responsável pelo monitoramento da manutenção da segurança de voo pode ser definido.

Tendo estabelecidas as bases para o desenvolvimento de um sistema embarcado voltado à segurança de voo neste capítulo, o próximo capítulo desenvolve os conceitos relacionados ao IFA e ao IFA²S.

5 Definição dos Conceitos de IFA e de IFA²S

Os capítulos anteriores visaram situar o leitor no ambiente e definir alguns requisitos de segurança fundamentais para a operação das aeronaves não tripuladas. O capítulo 4, em particular, permitiu uma apreciação de aspectos que envolvem o dilema entre a pilotagem humana do avião e a realizada de forma autônoma. A avaliação realizada indicou ser promissora a inclusão de um sistema adicional aos atualmente existentes em VANTs para que sejam melhor atendidos aspectos de segurança de voo. Este trabalho propõe um sistema embarcado para atendimentos de tais necessidades, chamados de IFA e IFA²S, definidos no presente capítulo.

5.1 Conceitos Preliminares sobre IFA e IFA²S

O aumento da utilização e as taxas elevadas de acidentes apresentados por VANTs, conforme já discutido, provocam discussões sobre os riscos envolvidos na sua integração ao espaço aéreo como o risco ao voar sobre regiões povoadas e a possíveis colisões com outros aviões (tripulados ou não) (WILLIAMS, 2004). Este capítulo introduz um sistema embarcado, o IFA²S (*In-Flight Awareness Augmentation System*), capaz de melhorar a segurança de voo através de um modelo de referência, o IFA (*In-Flight Awareness*). O IFA foi desenvolvido para tornar VANTs não só mais conscientes sobre si e sobre o mundo ao seu redor, mas também para torná-los capazes de realizar ações mitigadoras de forma autônoma, visando evitar acidentes ou reduzir suas consequências.

Aplicações civis e militares exigem cada vez mais o uso de VANTs, mas sua falta de confiabilidade e os riscos decorrentes da sua operação têm atrasado a regulamentação do uso pelas autoridades de aviação civil. A integração dos VANTs ao espaço aéreo deve, de alguma forma, estar de acordo com as regras impostas aos aviões tripulados. Não é razoável esperar que regras específicas sejam criadas para este tipo de aviação somente devido à dificuldade para atender as normas vigentes. Provavelmente, quando a probabilidade de falha catastrófica

for menor ou igual ao padrão atualmente aceito para a aviação geral, os VANTs terão acesso ao espaço aéreo. (WEIBEL e HANSMAN, 2005)

A metodologia de projeto e a falta de um piloto dentro do avião podem explicar porque os VANTs têm hoje as taxas de falha observadas nos primeiros anos da aviação mundial. Ao contrário de pilotos de aeronaves tripuladas, os pilotos dos VANTs não têm uma boa compreensão das condições do ambiente interno e externo e das regras para atendimento de aeronavegabilidade. Quando a bordo, os seres humanos têm a sua disposição cinco sentidos, que complementam os dados fornecidos pelos sensores da aeronave e contribuem diretamente no processo de controle da mesma. O VANT reage conforme decisões e comandos vindos do operador de uma estação de controle, geralmente no chão e em um local distante, tendo à sua disposição apenas alguns monitores com dados sensoriais. (PESTANA, 2011)

Além da perda da percepção sensorial, a ausência de seres humanos a bordo pode levar projetistas e fabricantes a relaxar rigores impostos aos aviões tripulados, para tornar o seu desenvolvimento e fabricação mais rápidos e baratos. Isto é particularmente verdade para os pequenos VANTs (menos de 25 kg), mas pode também acontecer em aeronaves maiores e mais complexas.

Acidentes com VANTs ocorrem não somente por causa da falta de identificação precoce de falhas em sistemas das aeronaves e condições externas adversas, mas também por falhas nos procedimentos operacionais. Quando os pilotos estão a bordo, há uma maior atenção a situações perigosas como baixa altitude, limites de velocidade e condições meteorológicas adversas. Com os pilotos no solo, há uma tendência natural para se ultrapassar certos limites operacionais e um maior relaxamento na observação das condições ambientais, tal como mostrado na Figura 3-11. Mais treinamento, procedimentos bem estabelecidos e um projeto de aeronaves adequado à situação e ao ambiente operacional poderiam ter evitado a enorme perda de VANTs sofridas pelos EUA e pelo Reino Unido

durante combates no Afeganistão e no Iraque, (WILLIAMS, 2004) e (THE GUARDIAN, 2013).

O objetivo deste trabalho é a utilização de IFA como um modelo de referência para o aumento da consciência situacional do VANT durante o voo, melhorando a segurança de voo. IFA²S é o sistema de bordo implementado a partir deste modelo de referência. Ao contrário de outros autores, como (FUCHS, FERREIRA, *et al.*, 2013), (MACHUCA, 2012) e (BYERS, 2010), este trabalho tem o foco no avião. Isto significa que, ao invés de aumentar o conhecimento da situação por pilotos e comandantes de missão, a ideia é tornar os VANTs mais conscientes sobre as condições de seus subsistemas (interno), perfil de voo, presença de intrusos (outros aviões) e condições ambientais externas próximas (geografia e clima). Com base nestes dados, decisões são tomadas de forma mais autônoma para evitar acidentes ou mitigar potenciais situações de perigo.

Para situar o contexto no qual o IFA está inserido, é necessário visualizar um VANT voando sobre um determinado terreno, levando alguns sensores de missão (sejam eles quais forem), para cumprir uma missão específica. Missões executadas pelo VANT são diversas e uma taxonomia pode ser encontrada em Nehme et al. (NEHME, CUMMINGS e CRANDALL, 2006).

O principal objetivo de uma missão de voo é ter a carga útil em uma posição definida, para adquirir algum tipo de informação de interesse ou entregar algo (não necessariamente um armamento). Durante a missão, a aeronave costuma manter contato com a estação de controle, se possível com o controlador de tráfego aéreo e, eventualmente, com outros aviões na proximidade. Ela navega usando um piloto automático para manter um plano de voo pré-definido capaz de realizar a missão. Sob o ponto-de-vista da missão, a aeronave é um provedor de serviços de transporte, localização e comunicação.

Figueira et al. (FIGUEIRA, TRINDADE, *et al.*, 2013) descreve uma arquitetura de carga útil chamada MOSA (*Mission Oriented Sensor Array*) como o subsistema responsável

pelo cumprimento da missão. Sistemas MOSA devem se comunicar com o piloto automático usando o SSP (*Smart Sensor Protocol*) para a troca de comando e de dados. O MOSA é o responsável por todos os aspectos relacionados com a missão, controlando não somente a carga útil, mas também a trajetória de voo.

Levando-se em conta tanto o propósito do voo e a distância a ser percorrida, (normalmente longe da estação de controle), por vezes, o plano de voo pré-definido deve ser alterado dinamicamente durante o voo. MOSAs adaptativos podem mudar a missão durante o voo enquanto MOSAs não-adaptativos devem ser usados quando é difícil ou mesmo impossível mudar a missão durante o voo. Esta definição é importante porque o IFA pode enviar restrições de trajetória de voo, devido a condições de segurança, somente ao MOSA adaptativo. Obviamente, a maioria dos VANTs não tem um MOSA a bordo, mas todos eles têm pilotos automáticos e preocupações com a segurança de voo.

IFA deve ser adaptado a situações específicas e às restrições que podem surgir do projeto do VANT e da sua missão. Ele deve ser projetado para superar algumas limitações atuais, aumentando a conscientização sobre o meio ambiente e sobre a própria aeronave. IFA supervisiona o voo e se mantém atento às possíveis ameaças à segurança. No caso de um evento ser reconhecido como perigoso, o IFA age de acordo para evitar ou mitigar os riscos. As ações podem variar de uma simples mensagem de alerta para a estação de controle ao comando de um pouso de emergência usando um paraquedas. Consequentemente, o projeto e integração de um sistema de IFA em um VANT dependem intrinsecamente das características da aeronave.

5.2 Dimensões do IFA e Definição do IFA²S

Esta seção descreve os conceitos associados ao processo de detectar e mitigar situações de risco o mais cedo possível. O núcleo de tal processo pode ser entendido como uma matriz n-dimensional, onde, em cada célula, existe um algoritmo de decisão específico. Se adequado, as células podem conter diferentes ou um mesmo algoritmo de decisão. Cada célula está relacionada a uma determinada situação caracterizada pela informação recolhida por sensores ou recebida de fontes subscritas.

Num primeiro nível, o IFA²S identifica uma ameaça à segurança e começa uma análise contextual mais aprofundada usando informações internas e externas adicionais. Uma vez que a situação é bem compreendida, o IFA²S atua em conformidade para evitar ou atenuar um acidente (ENDSLEY, 1995).

Há aspectos importantes relacionados com o IFA que necessitam de esclarecimentos. Alguns são discutidos nas subseções a seguir.

A. Dimensões do IFA

As dimensões do IFA são os domínios que proporcionam a entrada de dados para os algoritmos de decisão: tempo, aeronavegabilidade, condições de voo e informações adicionais sobre o resto do mundo.

O tempo é uma dimensão importante uma vez que um acontecimento tem significados diferentes dependendo do momento em que ele ocorre. É claro que uma situação de falha do motor, quando a aeronave está alinhada e perto da pista, é muito diferente da situação em que o mesmo evento acontece durante o voo sobre uma cidade. Em outra comparação, o tempo disponível para responder a uma possível colisão com outro avião é menor do que o tempo gasto ao se redefinir um percurso devido a limitações geográficas.

Aeronavegabilidade é definida como a segurança na operação de uma aeronave em um espaço aéreo específico e tem como componentes: certificação (projeto, simulação e testes), fabricação (deve refletir projeto) e manutenção (de acordo com as recomendações do fabricante e da autoridade aeronáutica) (FAA, 2014) (ANAC, 2010). O IFA deve aferir constantemente a aeronavegabilidade através de verificações nos sistemas da aeronave.

As condições de voo se referem às posições atuais e futuras da aeronave ao longo da trajetória de voo. O IFA deve verificar as condições meteorológicas, tráfego aéreo local e terreno sobrevoado. Pode reconhecer uma nuvem perigosa nas proximidades, outra aeronave em rota de colisão ou um incêndio em uma floresta, decidindo desta forma por uma mudança de rota, tomando controle sobre sistemas como MOSA e enviando comandos de navegação diretamente para o piloto automático. Para situações não urgentes e no contexto de MOSAs adaptativos, o IFA pode informar restrições de caminho de voo para o MOSA (através do piloto automático), solicitando a mudança do rumo atual.

As informações sobre o resto do mundo podem conter dados que afetam o percurso de voo. Normalmente, estas informações são fornecidas por fontes designadas previamente, pela internet ou recebidas de remetentes seguros. Por exemplo, uma mudança de status político pode criar uma nova fronteira e, conseqüentemente, uma nova restrição de voo para o VANT.

B. Sensores

Nos VANTs, alguns sensores foram retirados do *cockpit* com a saída do piloto. Sentidos como audição, olfato, visão e até mesmo o tato são sensores importantes para manter a segurança de voo. Conseqüentemente, sensores adicionais devem ser introduzidos nos sistemas de VANT para alimentar o sistema IFA com informações relevantes para garantir a segurança de voo.

Alguns sensores devem monitorar a aeronave para verificar a manutenção da aeronavegabilidade. Idealmente, esses sensores precisam coletar muito mais dados do que os

necessários para o piloto automático e controle de voo, tais como vibrações, temperatura interna, correntes anormais etc. Indicações sobre o estado dos sistemas da aeronave fornecidas pelos sensores, antes da ocorrência de uma situação grave, podem iniciar ações mitigadoras em tempo hábil para evitar falhas catastróficas.

Maneiras de perceber e identificar outras aeronaves é uma área de pesquisa importante devido às consequências óbvias de uma colisão no ar (CORNIC, GARREC, *et al.*, 2011), (GRIFFITH e LEE, 2011), (MEJIAS, LAI, *et al.*, 2012) e (CHOI, KIM e HWANG, 2011). Existem alguns protocolos para evitar que dois aviões fiquem demasiado próximos uns dos outros. Controladores de tráfego aéreo mantêm aeronaves afastadas umas das outras. A separação entre as aeronaves é garantida também por regulamentos aeronáuticos e, em último caso, os pilotos entram em ação percebendo a ameaça geralmente usando seus olhos (STARK, STEVENSON e CHEN, 2013). No caso dos VANTs, os pilotos estão em locais distantes e provavelmente serão incapazes de identificar um intruso em tempo de uma manobra evasiva. Existe, neste caso, a necessidade do uso de sensores para evitar colisões.

O sensoriamento geográfico pode levar em consideração diferentes aspectos. Informações podem ser armazenadas a bordo antes do início da missão ou serem recebidas e armazenadas durante o voo. Contudo, algumas situações operacionais podem obrigar a integração de sensores especiais destinados a identificar ocorrências no solo. Estas podem ser um fogo inesperado na floresta ou simplesmente a necessidade de saber com maior precisão a altitude de voo.

O sensoriamento meteorológico fornece informações para identificar condições de atmosfera inapropriadas para a operação da aeronave. O mau tempo é representado não somente por tempestades, mas também por ventos excessivos e condições que causam demasiada variação de razão de subida, com potenciais danos à estrutura ou a abertura indesejável do paraquedas, por exemplo.

O enlace de dados foi incluído como sensoriamento, apesar de não realizar qualquer medida do ambiente externo, por proporcionar a capacidade de se obter novas informações do mundo exterior. Dados relevantes em todas as dimensões citadas podem ser obtidos através do enlace de dados de estações em terra, outras aeronaves, controladores de tráfego aéreo, satélites etc.

C. Algoritmos de Decisão

Algoritmos devem ser definidos para a integração do IFA²S nas aeronaves. Uma vez que uma ameaça para a segurança de voo é identificada, boas decisões dependem do diagnóstico correto dos sintomas, tendo como base as informações de sensores, dados armazenados e fontes externas. Os eventos são correlacionados com as dimensões para a definição de ações determinadas por algoritmos pré-definidos. Um fluxograma de decisão de alto nível é apresentado na Figura 5-1.

Uma vez que uma situação de risco é reconhecida pelo sistema, verifica-se se a missão pode continuar ou não. Se essa ameaça está nas proximidades da aeronave, uma ação urgente pode ser necessária. Esse é o caso de uma possível colisão no ar com outra aeronave, uma condição meteorológica perigosa ou um problema gerado em solo (fogo em uma floresta, por exemplo). Se não for o caso, o sistema IFA verifica se a aeronavegabilidade está comprometida ou não e, se possível, comanda o retorno da aeronave à base. Se a aeronavegabilidade está comprometida e se o voo puder continuar em uma configuração degradada, também comanda retorno para a base. Todas as outras possibilidades levam a um pouso de emergência controlado, que deve ser entendido neste trabalho como o realizado em uma pista de pouso apropriada, em um terreno não-preparado (uma plantação de cana-de-açúcar, por exemplo) ou mesmo através da abertura do paraquedas. Como o leitor pode notar, um sistema IFA²S é definido não somente em função da configuração particular do VANT, mas também do seu perfil de missão.

Figura 5-1– Fluxograma de decisão IFA²S de alto nível.

D. Taxonomia

A seleção dos sensores e algoritmos precisa levar em conta as missões a serem realizadas e as limitações da aeronave em termos de massa, volume, energia e capacidade computacional. A variedade de tamanhos e configurações dos VANTs pode complicar o processo de definição de projeto do IFA²S em acordo com os requisitos definidos.

Para facilitar o processo de definição de componentes do IFA²S que será de fato implementado, apresenta-se na Tabela 5-1 uma taxonomia geral baseada nos conceitos apresentados anteriormente neste capítulo. O objetivo desta tabela é ajudar o engenheiro responsável na definição dos sensores que estarão a cargo da identificação de sintomas e eventos ocorridos durante a missão. Como exemplo, podemos identificar os elementos da Tabela que auxiliem na definição do IFA²S que irá compor uma aeronave de menos de 25kg voltada ao sensoramento remoto de áreas agrícolas. Neste caso hipotético, a aeronave será pequena, com propulsão elétrica voando em baixa altitude sobre área de operação bem delimitada. Para o mal funcionamento dos subsistemas, pode-se definir que as comunicações serão feitas através de um transponder customizado e redundante e que a coordenação com

o controle de tráfego será feito pela estação de terra. O sistema de comunicações pode ainda monitorar a presença de outras aeronaves na área de operações através de protocolos específicos (ADS-B, por exemplo). Para monitorar o sistema propulsivo, além da tensão e corrente da bateria, será também verificada a sua temperatura. Detectores especiais de fumaça podem identificar problemas elétricos antes de ocorrência de fogo interno. Algoritmos especializados podem calcular a autonomia e comparar com a distância da Base para alertar o piloto (seja humano ou eletrônico) sobre a necessidade de retorno automático. Acelerômetros e outros sensores podem verificar as vibrações e rotações existentes nos diversos eixos e alertar ao piloto sobre situações críticas ou a presença de condições meteorológicas adversas (a aeronave voa baixo e é demasiado pequena para embarcar um radar). Devido à necessidade de manter os limites da zona de operação, um GPS específico pode auxiliar a manutenção dos limites horizontais.

Tabela 5-1. A taxonomia auxilia na definição dos sensores que irão compor o IFA²S em um caso específico.

Origin	Event / Monitored data	Symptom / Data type	Sensor (Active/Passive)																			Data Source (Active/Passive)	
			Vibration	Inertial	Fuel flow	Fuel level	Battery temperature	Battery voltage	Ampere meter	Engine rotation	Smoke /smell detectors	Weather radar	S&A systems	TCAS	GPS receiver	Transponder	Dynamic pressure	Static pressure	Oil pressure	Pilot's View Camera	Radar	ATC	Data Link (wireless)
Platform	Subsystem malfunction	Lack of External Communication														X						X	
		Propulsion			X			X	X								X	X	X			X	
		Mission sensors						X	X		X												
		Electrical subsystem					X	X	X	X	X											X	
		Warning				X	X				X				X		X	X	X	X		X	
		Lack of propulsion power			X	X		X	X	X							X	X	X	X		X	
		Lack of system's power						X	X	X							X	X				X	
	Flight accomplishment	Autonomy			X	X		X	X	X							X	X					
		Abnormal vibration	X							X		X	X				X	X		X			

	Aircraft abnormal conditions	Abnormal attitude	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		X		X	X
		Sudden altitude change	X	X	X	X				X			X	X	X		X	X	X	X		X	X
Surroundings	Intruder												X	X	X	X	X	X		X		X	X
	Abnormal conditions*												X	X	X		X	X		X		X	X
	Bad weather conditions												X	X	X		X	X		X	X	X	X
Overflowed areas	Highly populated												X	X	X		X	X		X		X	X
	Sensible areas**												X	X	X		X	X		X		X	X
	Political borders												X	X	X					X		X	X
Elsewhere	Political Issue																					X	X
	Legal issue																					X	X

* Woodfire, vulcan explosion etc.

** Military, nuclear plants etc.

5.3 Processo de Definição e Integração do IFA²S na Aeronave

O sistema IFA²S atua como um agente supervisor e se comunica com o piloto automático ou atuadores de emergência de acordo com as circunstâncias (Figura 5-2). Pilotos automáticos devem cuidar do controle de voo, do posicionamento, navegação e comunicação externa (ATC, base de controle e outros aviões). O IFA²S deve ser integrado de forma que seja possível a troca de dados com o piloto automático e o uso de recursos de emergência, se disponíveis. No caso dessa integração não ser viável, devido ao projeto do piloto automático, o IFA²S pode usar os seus próprios recursos de segurança para contornar as limitações do sistema de controle de voo.

Figura 5-2– A integração do IFA na aeronave depende do projeto piloto automático.

O desenvolvimento de um sistema IFA²S para uma aeronave e uma missão específica fará uso de uma série de ferramentas, mas um processo de desenvolvimento do sistema precisa ser inicialmente definido. Considerando as diversas variáveis envolvidas no cenário operacional, as incertezas precisam ser resolvidas através da boa definição de escopo e requisitos no início do projeto. Inclui-se, na definição de requisitos, as questões relativas à segurança na operação como parte da aeronave. Desta forma, o projeto da aeronave será moldado desde o início visando o atendimento de requisitos funcionais, técnicos e de segurança. Assim, o IFA²S e os subsistemas componentes da missão são definidos a partir

deles. Após a definição dos componentes, verifica-se se existe ou não um nível de segurança aceitável (MATTEI, CUNHA, *et al.*, 2015).

5.4 Conclusão

Este capítulo definiu o *framework* chamado IFA e o conceito relacionado, chamado IFA²S, a ser embarcado na aeronave. O item 5.1 apresentou os conceitos preliminares do IFA e do IFA²S, o primeiro como um modelo de referência e o segundo como um sistema derivado a ser embarcado. O ambiente operacional enfrentado pelos VANTs é complexo e o item 5.2 apresentou as dimensões, sensores, algoritmos de decisão e taxonomia do IFA. O processo de definição de um sistema IFA²S feita a partir dos requisitos de segurança e a forma de integração na aeronave, comunicando-se diretamente com o piloto automático e/ou diretamente com sistemas da aeronave consta do item 5.3.

O STPA pode ser usado no início do projeto de forma a melhor definir os requisitos de segurança e outras técnicas para a obtenção de valores de confiabilidade do sistema. Conforme foi visto no Capítulo 4, o STPA é uma metodologia de análise de perigos e risco (*Hazard Analysis*) baseada na teoria de sistemas. Essa metodologia foi criada para ser aplicada em ambientes com requisitos de segurança demandantes e elevado conteúdo de software envolvido, o que acontece no caso dos VANTs. Os requisitos derivados foram usados para definir os sensores e algoritmos que serão implementados, levando em conta as características da aeronave e de operação. Para esta finalidade, os Capítulos 6 e 7 apresentarão um ambiente de simulação que permite o teste de soluções geradas. Para uma medida de probabilidade de acidentes do sistema final projetado, pode-se usar outras técnicas como a Análise da Árvore de Falhas e projeções específicas, como será verificado no Capítulo 8.

6 Simulação do IFA²S usando Labview e XPlane

Dada a complexidade das operações de um VANT e a dificuldade de estabelecer formatos e algoritmos para um sistema embarcado IFA²S atuar de forma satisfatória para evitar riscos, é importante a criação de um ambiente de simulação. Este deve ser capaz de testar as ideias e algoritmos nas diversas situações que podem se apresentar durante a realização de uma missão real. Assim, o objetivo deste Capítulo é apresentar um ambiente de simulação em que diferentes situações operacionais possam testar as soluções automatizadas criadas. Cabe ressaltar que os algoritmos apresentados não se destinam a serem soluções ótimas, o objetivo é apresentar uma plataforma de simulação como banco de testes flexível e de fácil uso.

6.1 Ambiente de Simulação

Para simular o voo, conforme enfatizado por (ARANTES, 2015), pode-se utilizar qualquer um dos diversos simuladores disponíveis no mercado como FlightGear, XPlane ou Microsoft Flight Simulator. O XPlane foi escolhido por ser bastante realista e apresentar fácil interface com o Labview, onde se executa o IFA²S e o controle de navegação. A Figura 6-1 apresenta a janela do XPlane durante o voo e a Figura 6-2 mostra o diagrama de blocos do Labview em que se lê os dados provenientes do simulador. Estas informações são usadas pelo Labview para controlar o voo da aeronave no XPlane e para alimentar a lógica do IFA²S.

Conforme foi verificado no Capítulo 4, uma série de requisitos de segurança precisa ser atendida para evitar as situações de perigo identificadas. De forma semelhante à escolha dos simuladores, havia uma série de aplicativos que poderiam criar estas situações e soluções na forma de uma máquina de estados, Labview e Matlab/Simulink são exemplos. O Labview foi escolhido por tornar mais simples a futura incorporação de instrumentos de medidas e possuir uma interface amigável. A Figura 6-3 apresenta o XPlane sendo controlado pelo Labview e a Figura 6-4 a interface do XPlane para transmissão e recepção de dados.

Figura 6-1– O XPlane foi escolhido como simulador de voo devido à facilidade de integração com o Labview e realismo na criação de cenários.

Figura 6-2– A leitura dos dados provenientes do XPlane é realizada no diagrama de blocos do Labview e é usada no controle da aeronave e da lógica do IFA²S.

A programação do Labview é composta por duas partes distintas: diagrama de blocos e interface. O diagrama de blocos define a lógica do IFA²S. A interface estabelece a interação com o usuário e o controle da simulação. Na Figura 6-3, observa-se os elementos principais da interface usada nas simulações. No extremo esquerdo, observa-se o cockpit da aeronave no simulador XPlane e as três janelas à direita são provenientes da interface do Labview,

sendo que os dados disponíveis ao Labview devem ser selecionados em janela do XPlane apresentada na Figura 6-4.

A segunda janela da esquerda para a direita da Figura 6-3 apresenta os alarmes necessários em caso de um evento que leve à uma situação de perigo. A terceira janela, onde se apresenta um mapa, estão disponíveis diferentes informações que podem ser apresentadas e serão discutidas uma a uma neste Capítulo. A última janela à direita está reservada para acompanhar o voo (altitude, velocidade, proa etc.) e para comandar manualmente as superfícies aerodinâmicas ou permitir o voo automático (piloto automático). O objetivo desta Figura é apresentar opções à interface com o piloto em terra, além do controle da simulação.

Figura 6-3– O Labview foi escolhido para ambiente da máquina de estados destinada a controlar o Xplane e testar as soluções IFA²S.

Figura 6-4– Interface do XPlane para seleção dos dados enviados ao Labview.

6.2 Máquina de Estados

A metodologia STPA, Capítulo 4, definiu requisitos de segurança para o sistema embarcado para evitar ou mitigar acidentes e perigos identificados. A máquina de estados definida neste item visa atender a estes requisitos e as simulações conduzidas no Labview serão responsáveis por criar tais estados.

Durante o voo da aeronave no XPlane, o sistema IFA2S permanece no estado “*Idle*” até que eventos levem à uma mudança de estado. Estes eventos podem ser gerados no XPlane ou dentro do próprio Labview para testar funcionalidades difíceis de retratar no simulador, como falha em um sistema interno, por exemplo. A interface permite selecionar para quais os eventos se deseja uma reação, pois alguns ensaios não devem interferir em outros durante a simulação. Em um teste de resposta à baixa altitude, onde a aeronave reage nivelando as asas, motor a pleno funcionamento e ângulo de ataque positivo, pode gerar medidas relacionadas à existência de turbulência vertical e comandar ações de retorno à base ou de abortar o voo (pouso em emergência ou abertura de paraquedas). Devido à complexidade e número de ações diferentes que podem ser tomadas durante o voo, a máquina de estados da Figura 6-5 foi definida a partir dos requisitos de segurança estabelecidos no Capítulo 4, como se observa na Tabela 6-1. Os itens seguintes descreverão os estados com mais detalhes. Contudo, é importante enfatizar que os algoritmos de decisão usados foram definidos para testar soluções particulares nesta tese, mas, ao mesmo tempo, devem ser alvo de trabalhos futuros.

Figura 6-5– Máquina de estados criada para atender aos requisitos de segurança identificados.

Tabela 6-1. Estados definidos a partir dos requisitos identificados.

Requisito	Estado
R1.1.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha a aeronave no envelope	Abnormal Attitude
R1.1.b.1ii – O sistema da aeronave devem fornecer meios para que o PA execute as ações corretas para manter a velocidade dentro dos limites previstos.	
R1.1.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha uma TBD faixa de segurança de velocidades dentro do envelope previsto.	
R1.1.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa a ação de manutenção das velocidades previstas.	
R1.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha uma TBD ft acima do terreno.	Low Altitude
R1.2.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA mantenha as ações corretas para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno.	
R1.2.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA comande correções no tempo certo e manter a altitude mínima de TBD ft acima do terreno.	
R1.2.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para manter a altitude mínima de segurança de TBD ft acima do terreno.	
R1.3.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que o PA realize manobras para evitar colisões em voo.	S&A Diagnosis, Action S&A
R1.3.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que o PA realize as manobras mais apropriadas para evitar colisões em voo.	
R1.3.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA realize manobras no tempo certo para evitar colisões em voo.	

R1.3.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para evitar colisões em voo.	
R1.4.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar área(s) de risco ou proibida(s) na rota de voo para que o PA evite seu sobrevoo.	Forbidden Area
R1.4.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar aeronaves próximas e fornecer meios para que o PA realize as manobras mais apropriadas para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s).	
R1.4.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA realize manobras no tempo certo para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s).	
R1.4.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para evitar o sobrevoo de área(s) de risco ou proibida(s).	
R1.5.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar condições meteorológicas adversas no voo para comandar ações ao PA que evitem riscos à segurança de voo.	Bad weather
R1.5.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar condições meteorológicas adversas no voo para comandar ações ao PA que mantenham a segurança de voo.	
R1.5.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA realize manobras no tempo certo para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados.	
R1.5.d.1ii – Os sistemas da aeronave devem fornecer meios para que o PA não interrompa as ações para evitar condições meteorológicas adversas na rota de voo que ofereçam riscos à segurança de voo associados.	
R2.1.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar falha de subsistema da aeronave para comandar ações ao PA de retorno à Base e, assim, evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave.	IS Diagnosis, Back Home, Loiter
R2.1.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar falha de subsistema da aeronave para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base e, assim, evitar falha catastrófica e perda de controle da aeronave.	
R2.1.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar falha de subsistema da aeronave no tempo certo para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base antes de acontecer falha catastrófica e perda de controle da aeronave.	
R2.1.d.1ii – Os sistemas da aeronave não devem interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à falha de subsistema da aeronave.	
R2.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar a piora das condições meteorológicas para comandar ações ao PA de retorno à Base e, assim, evitar a perda de controle da aeronave.	Bad weather, Back Home, Loiter
R2.2.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar a piora das condições meteorológicas para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base e, assim, evitar a perda de controle da aeronave.	
R2.2.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar a piora das condições meteorológicas no tempo certo para comandar corretamente ações ao PA para retorno à Base antes de acontecer a perda de controle da aeronave.	
R2.2.d.1ii – Os sistemas da aeronave não devem interromper a ação de retorno à Base, iniciada devido à piora das condições meteorológicas.	
R2.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar que a distância da Base é excessiva e comandar ações ao PA de retorno à Base.	Back Home, Loiter
R2.3.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de identificar que a distância da Base é excessiva e comandar ações ao PA de retorno à Base corretamente.	

R2.3.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que a distância da Base é excessiva e o PA comandar a ação de retorno à Base antes de acontecer a perda de enlace rádio.	
R3.1.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar o pouso em emergência.	Emerg, Route Calc, Loiter
R3.1.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar corretamente o pouso em emergência.	
R3.1.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos tardios de pouso em emergência que provoquem pouso descontrolado no solo.	
R3.1.c.2ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos precoces de pouso em emergência.	
R3.2.a.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar a abertura de paraquedas.	Abort Flight
R3.2.b.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de concluir que o voo deve ser abortado para comandar corretamente a abertura de paraquedas.	
R3.2.c.1ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos tardios de abertura de paraquedas que provoquem pouso descontrolado no solo.	
R3.2.c.2ii – Os sistemas da aeronave devem ser capazes de evitar comandos precoces de abertura de paraquedas.	

6.3 Implementação da Máquina de Estados no Labview

Conforme comentado anteriormente, a programação no Labview é feita em duas etapas, uma lógica em forma esquemática e outra de interface. Este item apresenta a interface criada para controlar a aeronave a partir das simulações efetuadas com o simulador de voo XPlane. Os diversos comandos, lógica, estados e interfaces necessárias tornaram complexo o diagrama de blocos de cada um dos estados. A interface serve para facilitar o entendimento do operador da situação e para que este selecione os eventos que deseja testar. A Figura 6-6 apresenta o diagrama de blocos geral do estado “Idle” apenas para ilustrar a abordagem utilizada, mas não permite o entendimento de cada uma das funções internas por ser demasiado complexo.

Figura 6-6– Diagrama de blocos geral do estado “Idle”.

Com a aeronave em voo simulado pelo XPlane, inicia-se o estado “*Init*” e a máquina de estados permanece em “*Idle*” até que haja um evento que provoque a mudança de estado (Figura 6-5). O “*Init*” serve para que o Labview leia alguns dados previamente armazenados, tais como a rota prevista, limites da área proibida e posição inicial de aeronaves, Figura 6-7. Para facilitar os testes, os eventos de interesse podem ser selecionados e acionados diretamente pelo usuário através de uma janela específica, imagem à esquerda na Figura 6-8. A ocorrência de um evento provoca a mudança de estado e a realização das ações previstas, com eventual aviso na janela de alerta, imagem à direita na Figura 6-8. Note que, a imagem à direita na Figura 6-8 apresenta uma situação em que foi permitida a detecção de aeronaves intrusas (sendo a número 2 a mais próxima), contudo a imagem à esquerda não permite o teste da função de evitar o choque em voo (botão da primeira linha desabilitado). Assim, o gerador de eventos da Figura 6-8 permite a geração de situações de perigo identificadas a serem identificadas pelo STPA. Na primeira linha na imagem à direita da Figura 6-8, seleciona-se uma rota de colisão da aeronave controlada com uma das aeronaves intrusas, introduzidas no estado “*Init*”. A segunda linha apresenta os botões de comando para falha de três sistemas internos, baixa tensão de bateria (*Bat Low Voltage*), temperatura da bateria (*Battery Temp*) e corrente (*Current*). A seleção dos valores para um destes subsistemas é feita em uma janela específica, Figura 6-13. A parte inferior da imagem da direita mostra uma série de botões para funções operacionais: Atitude anormal (*Ab Attitude*), retorno à base (*Back Base*), baixa altitude (*Low Altitude*), loiter (voo circular em torno de um ponto específico), abortar retorno à base (*Abort Back Base*), abortar *loiter* e, finalmente, evitar uma área proibida no solo (*Avoid Forbidden*).

Figura 6-7– A leitura de arquivos previamente preparados é realizada no estado “Init”.

Figura 6-8– À esquerda, tem-se a janela para seleção de eventos que devem ser identificados e mitigados pelo IFA²S e, à direita, tem-se a os alertas de eventos para acompanhamento e eventual intervenção do operador.

A janela desenvolvida para controle de navegação e da aeronave está na Figura 6-9. Na parte superior, pode-se verificar instrumentos que apresentam a proa magnética (graus), altitude (pés), velocidade (km/h), velocidade vertical (m/min ou pés/min), coordenadas geográficas da aeronave e potência do motor. Na parte inferior, tem-se os controles das superfícies aerodinâmicas (profundor, aileron e leme), controle de potência do motor, liga/desliga do piloto automático (PA) e os controles do trem de pouso e do freio. Com o botão do PA desabilitado, pode-se comandar as superfícies aerodinâmicas e o motor

manualmente, caso contrário, estes comandos ficam inoperantes. Os comandos do motor e das superfícies aerodinâmicas variam entre -1 e 1.

Figura 6-9— Janela para controle da aeronave.

Para controle automático de navegação, uma sub-rotina específica teve que ser definida para o voo. Esta sub-rotina de controle visa levar a aeronave de sua posição momentânea ao próximo waypoint, Figura 6-10 e Figura 6-11, definido através de latitude, longitude e altitude. Todavia, não tem como objetivo a criação de um sistema de pilotagem automática de bom desempenho no sentido de prover uma ótima manutenção de altitude, proa e radial entre dois waypoints. Como exemplo, este sistema de controle leva a aeronave até a altura do próximo waypoint, mas a mantém em torno de 200 pés (ft) em torno do valor previsto e não mantém a rota entre dois waypoints, apenas segue a posição do próximo.

Figura 6-10– Um sistema de controle automático foi criado no Labview para comandar a aeronave no XPlane e está presente em todos os estados, excetuando-se o “Init”.

Figura 6-11– Subrotina de controle de voo da aeronave criada no Labview. A janela da esquerda é a interface e a da direita apresenta a malha de controle usada.

A Figura 6-12 apresenta as janelas de dados e controle de eventos de distância máxima para a Base (esquerda) e de meio ambiente (direita). A posição e a distância máxima permitida da Base podem ser selecionadas e dois instrumentos apresentam a medida constantemente atualizada de distância e proa para a mesma. A janela dedicada à medida de meio ambiente apresenta a medida de vento (proa e intensidade) e turbulência (de asa e vertical).

A Figura 6-13 ilustra as interfaces para acompanhamento e controle das funções de pontos de navegação (waypoints), sendo a janela da esquerda dedicada aos dados e controle dos waypoints usados na navegação e a janela da direita voltada ao painel de instrumentos e controle de eventos dos sistemas internos.

A finalidade do controle de waypoints é permitir o acompanhamento da navegação e alterá-la se desejado. A partir dos pontos lidos em um arquivo específico no estado “Init”,

inicialização da máquina de estados, atualiza-se constantemente a distância, tempo e proa em relação a este ponto. Na maior parte dos testes, usaram-se quatro pontos, numerados de 0 a 3, voados nesta mesma sequência e em modo infinito, isto é, após o ponto número 3, a aeronave recomeça o processo em 0. O operador pode alterar o próximo waypoint através da seleção de um deles e acionamento do botão de comando. Em caso de evento comandado, como retorno à Base ou Pouso de Emergência, a rota em execução é abandonada e uma nova rota é armazenada. Neste caso, uma identificação numérica específica é usada, como 89 e 109, por exemplo.

A janela da direita da Figura 6-13 apresenta o painel de instrumentos para controle de eventos dos sistemas internos. Para o controle de limites pelo IFA²S, pode-se selecionar os valores padrão (*default*) para a temperatura e tensão da bateria e corrente no sistema e os limites para retorno à Base, Pouso de emergência ou Abortar o voo (significa abrir o paraquedas). A ideia geral é definir limites para que ações diferentes sejam acionadas com gravidade crescente, isto é, inicialmente existe a decisão de abandono da missão e retorno à estação de controle, após o pouso de emergência, caso se verifique que o risco de retorno à Base seja excessivo e, finalmente, como medida final e uma vez verificado que a aeronave deve encerrar seu voo, abre-se o paraquedas.

Figura 6-12– Janelas para apresentação de dados e controle de eventos de distância máxima para a Base (esquerda) e de Meio Ambiente (direita).

Figura 6-13– A janela da esquerda apresenta os dados e controle dos waypoints usados na navegação e a janela da direita o painel de instrumentos e controle de eventos dos sistemas internos.

A Figura 6-14 apresenta as janelas criadas para controle do sistema para evitar colisões em voo (S&A) e para apresentar o mapa de navegação. A janela dedicada ao S&A apresenta os dados atualizados de coordenadas das aeronaves intrusas (inicializadas no estado “Init”), a identificação de proa, distância da intrusa mais próxima e os limites desejados para desvio e alarme. Os limites estabelecidos são para as distâncias vertical e horizontal, mas os alarmes estão definidos para a distância horizontal e são apresentados em cor amarela e vermelha no painel de alarmes do operador. A janela da direita apresenta os elementos relacionados a posições geográficas importantes. Nesta, podem ser identificados a rota corrente (em verde), a rota percorrida pela aeronave (em azul), a posição da Base (pequeno quadrado verde), uma região proibida (quadrilátero vermelho) e a posição de três intrusos e suas respectivas rotas (em vermelho).

Figura 6-14– Janela de controle para evitar colisões em voo à esquerda e mapa de navegação à direita.

A Figura 6-15 mostra as janelas para medidas efetuadas em voo e os waypoints da rota prevista e corrente. A janela da esquerda mostra diversos gráficos que apresentam medidas realizadas em tempo real durante o voo. A janela da direita apresenta tabelas com os waypoints armazenados na inicialização da máquina de estados (“*Init*”) e com a rota corrente. Enquanto não houver alteração automática de voo, ambas as tabelas da janela da direita serão idênticas.

Figura 6-15– A janela da esquerda mostra diversas medidas efetuadas em voo e a da direita mostra os waypoints da rota prevista e em uso.

A Figura 6-16 mostra tabelas com vértices que determinam uma área proibida. Há 5 vértices na tabela que contém as coordenadas dos vértices e a Figura 6-14 mostra uma figura com somente quatro vértices. O quinto vértice possui coordenadas idênticas ao do primeiro e este artifício visa a apresentação de uma figura fechada. A tabela desabilitada na janela da direita da Figura 6-16 visa mostrar coordenadas do waypoint criado para evitar a área proibida.

Figura 6-16– Janela com as coordenadas dos vértices que determinam uma área proibida.

6.4 Implementação das Soluções para Eventos na Máquina de Estados

Este item descreve como cada um dos eventos foi definido. As soluções para cada uma das situações de perigo identificadas variam em complexidade e não tiveram o objetivo de serem testadas em voo. O objetivo destas soluções foi comprovar a aplicabilidade do IFA²S em uma situação simulada e comprovar a validade de uma plataforma de testes para soluções futuras.

A Figura 6-17 mostra o recurso usado para seleção de estado em caso de um evento ocorrer. Um detalhe presente no estado “Idle”, criado para dirigir a máquina para uma posição em que se encontre uma solução conveniente em acordo com o evento gerador, é

descrito. Esta máquina possui dois estados somente, “False” e “True”, sendo que o primeiro faz com que se mantenha o estado “Idle” enquanto o segundo provoca uma mudança.

Os estados definidos pelo diagrama da Figura 6-5, são descritos pelos subitens subsequentes. Neles são registradas a lógica e a implementação usada no Labview.

Figura 6-17– O detalhe mostrado na seta mostra uma máquina de estados dentro do “Idle” para seleção e mudança de estado.

6.4.1. COLISÕES EM VOO

Para as colisões em voo, os aviões intrusos foram criados como pontos dinâmicos cujas posições instantâneas são constantemente comparadas com a da aeronave. Caso estas distâncias relativas se tornem menores que um limite estabelecido em altura e no plano horizontal, existe uma ação do IFA²S. O exame destas posições relativas é realizado por uma subrotina específica, apresentada na Figura 6-18.

Detectar e evitar uma colisão em voo é uma das tarefas mais importantes no que se refere à segurança aérea. Por esta razão, utilizou-se um estado intermediário antes da tomada de decisão e realização das ações, chamado “*Diagnosis S&A*”. Na forma atual, este estado refaz os cálculos realizados em *Idle*, contudo, em formas futuras mais elaboradas, poderá verificar outras restrições e variáveis, como, por exemplo, se a manobra adotada faz com que

o VANT se aproxime em demasia de um aeroporto ou o coloca em rota de colisão com outra aeronave.

No lado esquerdo da Figura 6-18, observa-se a tabela com os intrusos (identificados através de um número, longitude, latitude, velocidade em km/h, proa e altitude), comandos para seleção de diferença de altitude, distância de atenção e de emergência. Quando o intruso está com diferença de altitude menor que a selecionada e distância menor que a de atenção, uma luz amarela acende no painel de alerta e a máquina passa ao estado de “*Diagnosis S&A*”. Caso a aproximação continue e a diferença de altitude permaneça abaixo do limite, a luz vermelha de emergência se acende no painel de alarme e o VANT muda sua rota para evitar a colisão. A solução usada foi a de identificar se a aeronave em rota de colisão está a direita ou a esquerda para criar um desvio contrário, isto é, se a outra aeronave está a direita, o desvio será realizado para a esquerda.

Figura 6-18– A subrotina “S&A_Idle” monitora a distância e a diferença de altitude das aeronaves ao redor do VANT no estado “Idle” e provoca a mudança para o estado “*Diagnosis S&A*” e eventualmente para “*Action_S&A*” para evitar colisão em voo.

Figura 6-19– Parte central do diagrama de blocos do estado “*Diagnosis S&A*”.

6.4.2. ÁREA PROIBIDA

O objetivo deste item é apresentar a lógica usada para evitar sobrevoos de zonas específicas, chamadas proibidas. Estas podem ser zonas povoadas, limites geográficos, aeroportos ou zonas sensíveis como área militar, armazenamento de combustíveis ou nuclear. Conforme foi verificado anteriormente, o risco de acidentes que provoquem danos pessoais ou materiais impedem uma maior disseminação dos VANTs e os estudos que serão apresentados no Capítulo 8 mostram que, de fato, estes riscos crescem muito quando a área sobrevoada se torna mais povoada. Assim, uma vez que foi identificada uma aproximação excessiva dos limites de uma zona proibida, o IFA²S comanda o estado “*Forbidden Area*”.

Em “*Idle*”, o IFA²S monitora a distância da aeronave às semirretas que definem a zona proibida e altera a rota, se a distância for menor que 10 km para evitar entrar na zona. Nesta simulação, o IFA²S realiza o desvio da área através do estado “*Forbidden Area*”. O algoritmo se baseia em equações geométricas simples, veja a Figura 6-20 e a Figura 6-21. Se $\theta_1 < 90^\circ$ e $\theta_2 > 90^\circ$, calcula-se a distância d do ponto P à reta.

$$\begin{aligned}\vec{v}_1 \cdot \vec{w} &= |\vec{v}_1| |\vec{w}| \cos \theta_1 \\ \vec{v}_2 \cdot \vec{w} &= |\vec{v}_2| |\vec{w}| \cos \theta_2 \\ d &= \frac{|\vec{w} \times \vec{v}_1|}{|\vec{v}_1|}\end{aligned}\tag{6.1}$$

Figura 6-20— Geometria usada para determinar a distância da aeronave aos limites da área proibida.

Figura 6-21— Estado “Forbidden Area” para evitar sobrevoos de área proibida.

6.4.3. FALHA EM SUBSISTEMA INTERNO

Este item apresenta o monitoramento e as ações em caso de falha de alguns sistemas da aeronave. Foram selecionados apenas três como prova de conceito e criação de soluções padrão.

Existem dezenas e às vezes centenas de sistemas e subsistemas dentro de uma aeronave e todos podem apresentar problemas em voo e, em maior ou menor grau, provocar riscos à segurança da operação. Os três selecionados, tensão e temperatura da bateria e corrente no sistema, são exemplos de subsistemas cuja falha pode ocasionar situação de perigo (Figura 6-22), mas as consequências dependem da configuração da aeronave em particular. Em uma aeronave elétrica, a queda de tensão da bateria pode provocar a falência do sistema motopropulsor e a queda do avião. Em uma aeronave com motor a combustão, a queda de tensão da bateria pode derrubar a aeronave caso haja a perda de um sistema crítico. O

aumento excessivo da temperatura da bateria pode provocar incêndio. A corrente deve ser monitorada, pois picos de corrente podem provocar danos a alguns sistemas da aeronave.

Figura 6-22– Parte central do diagrama de blocos do estado “Idle” com as subrotinas que monitoram alguns subsistemas da aeronave.

A parte inferior direita da Figura 6-13 mostra os comandos na interface do operador para seleção dos valores nominais, de emergência e para abortar voo para cada um dos três subsistemas da aeronave selecionados. Existem três situações operacionais de voo em que se realizam o monitoramento da saúde destes sistemas: voo normal (“Idle”), retorno à Base (“Return Home”) e *Loiter* (voo circular em torno de um ponto).

A Figura 6-23 mostra a lógica de seleção para mudança de estado a partir de “IS”. Uma vez que o limite de emergência é cruzado, a máquina de estados entra em “IS” para ser dirigida ao estado anterior (“Idle”, “Return Home” ou “Loiter”), realizar pouso de emergência ou abortar o voo com abertura de paraquedas.

Figura 6-23– Parte do diagrama de blocos do estado “IS” para decisão sobre mudança de estado.

6.4.4. ATITUDE ANORMAL

Este estado foi definido como uma forma de corrigir posições excessivas de rolamento e arfagem, e como intermediário para abortar a missão ou o voo. O sistema de controle definiu que o rolamento máximo em curva é de ± 40 graus e de arfagem de ± 10 graus, contudo a presença de elementos perturbadores no sistema pode fazer com que este limite seja excedido em demasia.

Um fator comumente encontrado nos voos, turbulência atmosférica, faz com que os limites definidos na malha de controle sejam excedidos. Como será verificado com maiores detalhes no item 6.4.5, foi fato comum verificar como a meteorologia faz com que os ângulos de rolamento sejam excessivos e coloquem a aeronave em uma atitude perigosa, de difícil controle. Uma vez que o IFA²S, em seus estados “Idle”, “Back Home” ou “Loiter”, identifique uma atitude perigosa, a máquina de estados entra no estado “AbA” para correção de atitude anormal. Uma vez corrigida a atitude excessiva, o estado original é restaurado (“Idle”, “Back Home” ou “Loiter”). Veja Figura 6-24.

A lógica usada neste estado é fazer com que as superfícies de comando nivelem as asas e coloquem o avião em voo nivelado por um tempo determinado (cerca de um segundo). O ângulo de rolamento máximo em curva é de ± 40 graus e foi definido entrar no estado “AbA”

sempre que este ângulo for maior que 60 graus. Caso o ângulo seja maior que 85 graus, o voo é abortado e o paraquedas é aberto.

Figura 6-24— Estado “AbA” para correção de atitudes perigosas corrige ângulos excessivos de rolamento e arfagem.

6.4.5. METEOROLOGIA

Conforme foi verificado no Capítulo 3, a meteorologia é uma das principais causas de acidentes aéreos e a falta do piloto a bordo torna a situação ainda mais complicada devido à necessidade adicional de monitoramento. Uma vez que o piloto na estação de controle não sente a turbulência provocada pela atmosfera, ele/ela precisa estar atento a mais um fator de controle, conforme identificado pela matriz de requisitos criada pelo STPA. Neste caso, é necessário incluir alertas adicionais ao monitor do piloto e, segundo a proposta deste trabalho, inserir reações autônomas para evitar ou mitigar os efeitos da meteorologia sobre o voo da aeronave. Como exemplo, cita-se um acidente ocorrido ao final de Abril de 2014 devido às condições meteorológicas quando a empresa AGX realizava voos nas fazendas da universidade de Purdue, West Lafayette (IN, EUA), com o VANT Arara.

O Arara possui um sistema de abertura de paraquedas programado para abrir em situações específicas. Uma destas condições é a derivada da altitude com o tempo (chamada *climb* e medida em metros ou pés por segundo) e o sistema de segurança foi programado para acionar a abertura do paraquedas quando o limite de 13m/s fosse ultrapassado. A Figura 6-

25 e a Figura 6-26 contêm dados cedidos gentilmente pela empresa AGX e mostram que durante o voo houve uma variação constante da velocidade vertical entre $\pm 5\text{m/s}$ com picos em 10m/s . O piloto era experiente e tinha acesso a estes dados, deveria, assim, ter abortado a missão, pois seria esperado que, em algum momento, houvesse o cruzamento do limite de 13m/s . Contudo, ele estava com a sua atenção voltada a outros fatores, tais como respeitar os limites vertical (100ft) e horizontal, autonomia e realizar o imageamento previsto naquela missão, não percebendo a situação. Este é um exemplo interessante de falta de consciência situacional que precisa ser corrigida por uma interface mais adequada para o piloto conforme estabelecido pelo IFA²S.

Figura 6-25– Abertura do paraquedas em voo da aeronave Arara na Universidade de Purdue, EUA. Imagem cedida pela empresa AGX.

Figura 6-26– Medidas da velocidade vertical em voo da aeronave Arara na Universidade de Purdue, EUA. Imagem cedida pela empresa AGX.

Durante o desenvolvimento das simulações, ficou claro que identificar turbulências atmosféricas de forma autônoma obrigava a um melhor entendimento de seus efeitos sobre a aeronave. As turbulências provocam variações aleatórias nos eixos longitudinal e transversal da aeronave (rolamento e *climb*, respectivamente) que podem estar misturadas ou mesmo confundidas com correções de altitude e de proa provenientes da própria navegação do piloto. Para criar situações controladas, fez-se uso da interface de condições atmosféricas do simulador XPlane.

A Figura 6-27 apresenta a janela para controle das condições atmosféricas do simulador XPlane. Os principais comandos usados para determinar uma forma de identificar turbulências e avaliar a necessidade de ações estão numerados nesta figura. O número “1” mostra os controles que permitem alterar a visibilidade e a precipitação, descargas elétricas são vistas se houver incremento do nível de tempestades. A palavra *CAVOK* inscrita na Figura é um jargão aeronáutico comum e significa “*Ceiling And Visibility are OK*”, nenhuma nuvem abaixo de 5.000ft (*ceiling*) e visibilidade horizontal acima de 10km. Os controles indicados com o número “2” controlam a turbulência no eixo de rolamento e os ventos em baixa altitude. Para provocar as variações na velocidade vertical, fizeram-se variações nas duas barras indicadas com o número “3”. Os controles da seta 1 permitem apenas alterar o aspecto visual a partir da cabine da aeronave, sendo, portanto, de pouco interesse prático nas

simulações. Aqueles identificados com 2 e 3, ao contrário, permitiram alterar a intensidade de forma separada para cada um dos eixos (rolamento e vertical, respectivamente). O vento também pode ser controlado através dos controles da seta 2 e seus dados foram calculados e apresentados no Labview, conforme pode ser verificado na janela do meio ambiente na Figura 6-12. A estratégia para entendimento e realização de uma metodologia para identificação de turbulência usou os controles das setas 2 e 3, Figura 6-27, em quatro níveis de forma isolada inicialmente e em conjunto para validação dos resultados. No primeiro, nenhuma turbulência era permitida e no último era usado o limite máximo possível, sendo as duas etapas intermediárias posicionadas de forma a dividir a faixa permitida em três partes aproximadamente iguais, veja Figura 6-28. Voos de uma hora em cada uma das situações, com o acompanhamento da velocidade vertical (variação da altitude) e ângulo de rolamento, permitiram as conclusões para o estabelecimento de uma estratégia com baixo nível de falso alarme (aviso de turbulência sem que ela exista) e um tempo de detecção aceitável (5 min na média).

Figura 6-27– Interface do XPlane para gerar diferentes condições meteorológicas. A seta 1 mostra os controles para alterar o aspecto visual a partir da cabine da aeronave; A seta “2” mostra os controles de turbulência no eixo de rolamento e os ventos em baixa altitude. Para provocar as variações na velocidade vertical, fizeram-se variações nas duas barras indicadas com o número “3”.

Figura 6-28– Quatro níveis de intensidade de turbulência vertical usadas nos testes.

Para estimar a turbulência vertical, foi usada inicialmente a velocidade vertical, obtida a partir da derivada da altitude fornecida pelo XPlane. Apesar da facilidade de obtenção dos dados de velocidade vertical, realizar a estimativa com baixo nível de falso alarme da turbulência no eixo vertical não foi evidente. A Figura 6-29 mostra que diferenciar as medidas realizadas em voos de uma hora nos quatro níveis de turbulência indicados na Figura 6-28 não é visualmente possível e de difícil classificação automática. Os picos da Figura 6-28 são consequência de comandos deliberados de correções bruscas de altitude provocadas para verificar diferenças em relação àquelas provocadas pela natureza. Assim, a estratégia apresentada no voo da aeronave Arara é válida por ser simples (máximo das medidas de *climb*), mas pode levar à conclusões errôneas e ações tardias ou indevidas, conforme previsto pelo STPA.

Figura 6-29– Velocidade vertical medida em voos de uma hora em quatro níveis de intensidade de turbulência vertical.

Conforme foi verificado através da Figura 6-29, a comparação da velocidade vertical em diferentes níveis de turbulência não permite uma estimativa segura das condições atmosféricas. Esta figura mostra, no entanto, que existe aumento na variação da velocidade vertical com o incremento da turbulência que pode ser entendido como ruído adicionado ao sinal. A estratégia adotada foi realizar a medida do desvio padrão de 40 amostras consecutivas de velocidade vertical e verificar se 30 medidas do desvio padrão consecutivas ficam acima de certo patamar. A Figura 6-30, Figura 6-31, Figura 6-32 e Figura 6-33 mostram que é possível distinguir os níveis de turbulência através do aumento dos valores

mínimos. Isto é, a média do desvio padrão da velocidade vertical em uma turbulência de nível 2 (W2) é maior do que a média do desvio padrão da velocidade vertical em uma turbulência de nível 0 (W0). Assim, as simulações identificaram diferentes turbulências a partir da média do desvio padrão da velocidade vertical (derivada da altitude no tempo). A quantidade de amostras e os valores usados, registrados nas equações (6.2) a (6.4), foram determinados empiricamente durante os voos simulados.

Usando os valores encontrados para a velocidade vertical dos voos e a estratégia adotada, uma validação foi realizada e os resultados estão na Tabela 6-2. Nesta tabela, é verificado se as 20 amostras consecutivas estão acima do limite estabelecido (150) para haver a contagem. Percebe-se que o aumento ou diminuição deste patamar afeta diretamente a contagem, sendo assim, ele determina a sensibilidade da solução. Valores limite maiores diminuem a taxa de alarme e valores menores aumentam.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} (\dot{h} - \mu)^2}; \mu = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \dot{h}_i(1) \quad (6.2)$$

$$N_T = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (\sigma - \mu_\sigma)^2} \quad (6.3)$$

$$\begin{cases} N_T \geq 150 \Rightarrow \text{Turbulência} \\ N_T < 150 \Rightarrow \text{Não Turbulência} \end{cases} \quad (6.4)$$

Figura 6-30– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 0 e 1.

Figura 6-31– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 1 e 2.

Figura 6-32– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 0 e 2.

Figura 6-33– Desvio padrão da velocidade vertical medido em voos de uma hora nas condições de turbulência vertical nível 1 e 3.

Tabela 6-2. Índice de alarme na identificação de turbulência vertical em relação ao limite inferior. Foram realizados voos de uma hora em cada uma das condições.

Limite	W0	W1	W2	W3
350	0%	0%	1%	3%
250	0%	2%	7%	46%
150	5%	13%	66%	98
100	17%	39%	99%	100%

Para identificar a presença de turbulência no eixo de rolamento, foi adotada uma estratégia semelhante à realizada com a velocidade vertical. Da mesma forma que no caso da velocidade vertical, a identificação de presença de turbulência a partir da medida do ângulo de rolamento se mostrou difícil. Diferentes estratégias foram montadas no Labview a partir de voos realizados no XPlane com variações de turbulência, Figura 6-34.

A Figura 6-48 mostra medidas no ângulo de rolamento em quatro níveis de turbulência. Para facilitar a identificação de diferenças, a Figura 6-36 mostra um aumento das variações e limites máximos de rolamento atingidos nos níveis 0 e 3. A malha de controle limitou o ângulo de rolamento em 40 graus, mas se percebe que o nível de turbulência 3 leva a aeronave a ângulos de 80 graus o que representa um risco à segurança do voo. Estes picos podem disparar ações de encerramento do voo, Figura 6-25, mas as medidas anteriores poderiam evitar esta situação.

Para que a aeronave identifique a presença de turbulência no seu eixo de rolamento, antes da abertura de paraquedas e encerramento do voo, foi adotada uma estratégia semelhante àquela para detecção de turbulência vertical. O cálculo do desvio padrão a partir das medidas do ângulo realizadas de rolamento se mostrou adequado para esta finalidade e a

Figura 6-37 mostra o crescimento do valor médio do desvio padrão com o aumento da turbulência.

Usando os dados obtidos nas simulações, foram testados diversos limites inferiores para a média do desvio padrão de rolamento. A Tabela 6-3 apresenta o índice de detecção para quatro níveis diferentes de turbulência de rolamento. Conforme pôde ser verificado na Figura 6-37, o valor médio do desvio padrão cresce com o aumento de turbulência, assim, o aumento ou diminuição de um limite de detecção varia a sensibilidade e a quantidade de alarmes de turbulência.

Figura 6-34— Interface do XPlane para seleção de turbulência de rolamento. A imagem da esquerda mostra a seleção de turbulência nível W0 e a da direita nível W2.

Figura 6-35— Medida do ângulo de rolamento em voos de 1 hora nas condições de turbulência níveis W0, W1, W2 e W3.

Figura 6-36– Medida do ângulo de rolamento em voos de 1 hora cada nas condições de turbulência níveis W0 e W3.

Figura 6-37– Desvio padrão das medidas do ângulo de rolamento nas condições de turbulência níveis W0 e W3.

Tabela 6-3. Índice de alarme na identificação de turbulência no eixo de rolamento em relação ao limite inferior. Foram realizados voos de uma hora em cada uma das condições.

Limite	W0	W1	W2	W3	W4
0.002	46.7%	76.8%	92.5%	95.6%	98.3%
0.005	16.5%	25.5%	57.8%	76.3%	87.6%
0.007	0.7%	8.1%	31.2%	54.6%	72.1%
0.010	0.0%	0.9%	6.6%	26.9%	39.9%
0.015	0.0%	0.2%	1.1%	4.9%	9.1%
0.020	0.0%	0.0%	0.7%	1.6%	4.3%
0.025	0.0%	0.0%	0.4%	0.6%	1.5%

Uma vez estabelecidas estratégias de identificação para turbulências nos eixos vertical e longitudinal, é necessário implementar esta função no IFA²S do Labview. A diminuição dos limites de detecção aumenta a sensibilidade quanto à turbulência, mas pode causar falso alarme e a interrupção da missão ou do voo prematuramente. No sentido contrário, o aumento destes limites diminuem as chances de encerramento prematuro da missão, mas aumentam o risco de voo em ambiente turbulento.

A estratégia geral implementada foi contabilizar o número de vezes em ocorrem a ultrapassagem de ambos os limites mínimos e, a partir de certo número, gerar os eventos e as mudanças de estado; onde a natureza traz sempre as duas variações em condições meteorológicas adversas. O contador de ocorrências de turbulência da Figura 6-38 verifica o número de vezes em que os limites de turbulência em ambos os eixos vertical e de rolamento (longitudinal) ocorrem e permite diminuir a quantidade de falso alarme. Conforme comentado anteriormente, a medida adotada inicial é de retorno à Base, mas pouso de emergência e abertura de paraquedas seguem à esta medida se houver ultrapassagem de limites maiores do contador ou se configurar uma atitude anormal (rolamento maior que 80 graus, por exemplo).

Figura 6-38– O contador de ocorrências de turbulência verifica o número de vezes em que os limites de turbulência no eixo vertical e de rolamento (longitudinal) são ultrapassados.

Figura 6-39– Número de ocorrências de turbulência simultânea nos eixos vertical e longitudinal em função de limites mínimos estabelecidos para os respectivos desvios padrão.

6.4.6. BAIXA ALTITUDE

A transição para um estado de proteção em caso de baixa altitude é feita sempre que a aeronave possui altura em relação ao terreno inferior a certo valor pré-estabelecido. O XPlane provê os valores de altitude de voo da aeronave em relação ao nível médio do mar e a sua altura em relação ao terreno em sua vertical. Assim, a máquina de estados no Labview monitora esta altura e comanda a mudança de estado para “Alt”.

No estado “Alt”, o algoritmo implementado realiza correções simples, mas eficientes para evitar choque com o terreno. A altura selecionada nos testes foi de 1500ft e quando a aeronave cruza este limite mínimo, o Labview comanda motor a 100% (máxima potência),

nivelamento de asas e arfagem positiva de 10 graus. Assim que o avião está acima de 3.500ft, o IFA²S retorna ao estado que estava anteriormente (“Idle”, “Back Home” ou “Loiter”) e a aeronave se dirige novamente à navegação original, anterior ao comando de correção de altura.

6.4.7. PLANEJAMENTO DE POUSO DE EMERGÊNCIA AUTOMÁTICO

O IFA²S necessita incorporar capacidades para a tomada de decisões em situações críticas da aeronave. Estas devem ser autônomas e rápidas e, ao mesmo tempo, reduzir ao máximo as chances de acidentes e danos a pessoas e construções.

Em caso de uma falha que impossibilite o retorno à base, pode-se executar a abertura do paraquedas e finalizar o voo, mas esta ação pode resultar em danos ou mesmo perda total da aeronave. Uma opção é a aeronave buscar um local onde as chances de um pouso automático possa ser realizado, com chances mínimas de danos às pessoas ou propriedades. Esta opção foi incorporada no IFA²S através de Algoritmos Genéticos (AG) como uma alternativa em situações específicas, quando o AG levará a aeronave até o local selecionado e considerado próprio a um pouso automático. Importante ressaltar que os algoritmos necessários a esta aterragem autônoma não foram incorporados.

O IFA²S analisa continuamente a região circundante à rota percorrida pela aeronave, através da leitura de um mapa do local armazenado previamente em sua memória. Neste mapa são definidas três regiões distintas: 1. Zonas em que existem concentrações excessivas de pessoas e a aeronave não pode sobrevoar (**ZNN**); 2. Zonas sem pessoas e construções, mas com características topográficas não completamente adequadas a um pouso de emergência (**ZFL**); 3. Zonas apropriadas para pouso em emergência automático (**ZAT**); e 4. Zonas inertes (**Zonas Restantes**). O AG deve prover soluções que evitem sobrevoos da zona 1 e privilegie o pouso na zona 3, mas mantendo a zona 2 como opção. A simulação desenvolvida conduz a aeronave para uma região desabitada e sem construções, evitando o sobrevoos de locais povoados e a modelagem do problema adotou solução semelhante à descrita por (ARANTES, 2015) para planejamento de caminho com alocação de riscos.

O algoritmo foi testado em diferentes situações para verificar o seu índice de acerto e a Tabela 6-4 informa os parâmetros utilizados nos testes. A abordagem de solução por AG privilegia a velocidade na produção de waypoints e o baixo processamento pela máquina a fim de facilitar seu eventual embarque na aeronave, mas não proporciona uma solução ótima. Os cenários criados visaram verificar se a solução evitava as regiões proibidas e seu comportamento na seleção das regiões atrativas.

Foram realizadas duas mil simulações em dez situações diferentes e os resultados obtidos forneceram não somente a confiança no algoritmo, como também percepções de como devem ser produzidos os mapas e as situações em que o algoritmo possui maior índice de erros. A melhor situação foi aquela em que havia somente uma área atrativa e esta estava posicionada de forma a não haver necessidade de desvio rápido de uma ZNN. O aumento das opções de pouso e a proximidade de zonas aumentaram o índice de erros.

Em todas as simulações, manteve-se a velocidade de 84km/h, a capacidade máxima de curva de 3graus/s e o tempo máximo de voo de 2 min e 50 segundos. Mede-se a proa da aeronave a partir da vertical sendo positiva no sentido horário, conforme Figura 6-40. Chama-se de n as regiões proibidas, de b as atrativas e de p as opcionais. Todo o resto do cenário é mantido como inerte do ponto de vista do AG. A aeronave sempre estará no centro do cenário e as coordenadas limites das regiões transformadas em distâncias x , horizontal, e y , vertical a partir deste centro (metros).

Tabela 6-4. Parâmetros do algoritmo utilizado nos testes de recálculo de rota com AG.

Tamanho da População: 100
Tamanho do Torneio: 3
Taxa de Crossover: 70
Taxa de Mutação: 10
Total Avaliações: 10000
Total de Execuções: 10 para cada caso
Parâmetro alfa do BLX-: = 0.25

Figura 6-40– Nas simulações, a proa da aeronave é medida a partir do eixo vertical e é positiva no sentido horário.

Tabela 6-5. Resultados das simulações com o AG variando a proa da aeronave. Foram realizados 200 testes em cada caso, totalizando 2.000 testes.

Situação	Proa da Aeronave (graus)	Acertos	Desvio Padrão no eixo x (m)	Desvio Padrão no eixo y (m)
1	270	100%	5	5
2	227	100%	6	8
3	270	59%	103	59
4	270	71%	95	125
5	73	79%	64	14
6	358	80%	65	18
7	335	84%	339	32
8	176	95%	12	14
9	101	87%	70	49
10	118	14%	-	-

a. Teste 1

A proa da aeronave foi de 270 graus e somente uma área atrativa (b1) entre ± 90 graus em relação à proa. O algoritmo teve 100% de acerto nas 200 simulações, com desvio padrão de 5m nas direções x e y. Os resultados típicos são apresentados na Figura 6-41.

Figura 6-41– Aeronave com ângulo de 270 graus, sem necessidade de desvio de zona proibida e apenas uma opção de zona atrativa ao redor da proa inicial produziu 100% de acerto.

b. Teste 2

A proa da aeronave nesta situação foi de 227 graus e esta difere da anterior em relação à posição relativa da zona atrativa b1. Neste caso, a aeronave é obrigada a realizar curva à direita. O algoritmo teve 100% de acerto na zona b1 nas 200 simulações, com desvio padrão de 6m na direção x e de 8m na direção y. Os resultados típicos são apresentados na Figura 6-42.

Figura 6-42– Aeronave com ângulo de 227 graus produziu 100% de acerto nas simulações.

Teste 3

A zona b1 foi movimentada em relação às duas situações anteriores de forma a obrigar o desvio de zona proibida para atingi-la. A proa da aeronave foi de 270 graus e somente uma área atrativa (b1) entre ± 90 graus em relação à proa. Apesar de 59% das tentativas terem levado a aeronave à zona b1, 41% não atingiram o objetivo e a aeronave terminou em zona inerte (branca). Neste caso, o desvio padrão foi de 103m na direção x e de 53m na direção y, enormes se comparados com a situação anterior. Notou-se também que, em algumas simulações, houve desvio excessivo da zona proibida. Alguns resultados são apresentados na Figura 6-43.

Figura 6-43– Aeronave com ângulo de 270 graus produziu 59% de acerto.

c. Teste 4

A zona b1 foi mantida na posição da situação anterior (2) e uma terceira zona atrativa (b3) foi criada na mesma distância e posição relativa da zona b1 em relação à aeronave. A proa da aeronave foi de 270 graus e somente uma área atrativa (b1) entre ± 90 graus em relação à proa.

Ao contrário da zona b1, a zona b3 poderia ser atingida sem desvio de rota e seria uma opção aparentemente mais fácil. Ao contrário do que se esperava, o algoritmo escolheu seu último waypoint na zona b3 em somente 6% das simulações, ficando 64% na zona b1 e 29% em zonas branca inertes. Alguns resultados são apresentados na Figura 6-44.

Figura 6-44– Aeronave com ângulo de 270 graus e com duas zonas atratoras nas vizinhanças da proa produziu 71% de acerto.

d. Teste 5

Nesta situação a aeronave possui apenas uma área atrativa óbvia (b2), mas se confronta com a necessidade de evitar duas zonas de não sobrevoos (n1 e n2) e ter de sobrevoar uma zona possível (p1). A proa de 73 graus da aeronave foi escolhida forma a minimizar a necessidade de desvios das zonas n1 e n2. A aeronave atingiu a zona b2 em 64% das simulações, a zona p1 em 15% e em 20% a zona branca entre as b2 e p1. O desvio padrão em x foi de 64m e em y foi de 14m.

Figura 6-45– Aeronave com ângulo de 73 graus produziu 79% de acerto.

e. Teste 6

A aeronave possui proa praticamente norte, proa 358 graus. Nesta situação, as zonas b1 e b2 parecem igualmente atrativas em relação à proa, mas a b1 tem seu acesso dificultado pela zona proibida n1. As simulações levaram a aeronave à zona b2 em 71% das tentativas, à zona p1 em 9% e às zonas inertes brancas em 19%, evitando a zona proibida em 100%. O desvio padrão em x foi de 65m e em y de 18m.

Figura 6-46– Aeronave com ângulo de 358 graus produziu 80% de acerto.

f. Teste 7

A situação 7 apresenta um quadro quase idêntico ao anterior, situação 6, a aeronave possui proa de 335 graus. Diferentemente da situação 6, nesta, a zona b1 está mais próxima da proa da aeronave e traz a necessidade de desvio imediato da rota. Por sua vez, a zona b2 força maior ângulo inicial, mas a zona proibida n1 não é tão restritiva após este desvio inicial.

As simulações levaram a aeronave à zona b1 em 72% das tentativas, 11% para a zona p1, 15% para zonas brancas inertes e somente 1% para a zona b2. A zona proibida foi evitada em 100%. O desvio padrão em x foi de 339m e em y de 32m. O desvio padrão em x foi grande devido à disposição do cenário (zonas atrativas a esquerda e direita e proibida em frente).

Figura 6-47– Aeronave com ângulo de 335 graus produziu 84% de acerto.

g. Teste 8

Nesta situação, a proa da aeronave é invertida em praticamente 180 graus em relação à situação 6, passando para a proa de 176 graus. A aeronave atingiu a zona b1 em 95% das simulações e a zona inerte branca nos restantes 5%. O desvio padrão em x foi de 12m e em y de 14m.

Figura 6-48– Aeronave com ângulo de 176 graus produziu 95% de acerto.

h. Teste 9

A situação 9 buscou explorar a dificuldade em atingir uma zona atrativa na condição de proximidade e com ângulo convergente para uma zona proibida. Nestas condições a aeronave deveria desviar da zona proibida e ainda buscar atingir a zona atrativa. A proa foi de 101 graus e a aeronave atingiu a zona b2 em 82% das simulações, a zona p1 em 5% e a zona inerte branca nos restantes 12%. O desvio padrão em x foi de 70m e em y de 49m.

Figura 6-49– Aeronave com ângulo de 101 graus produziu 87% de acerto.

i. Teste 10

Esta situação apresenta um posicionamento e proa críticas para a aeronave. Ela está próxima e direcionada para uma zona proibida (proa de 118 graus) e seu ângulo de curva não é suficiente para evitar o sobrevoo da mesma.

O algoritmo genético não conseguiu convergir de forma apropriada nesta situação. A aeronave atingiu a zona b2 em 7% das simulações, a zona p1 em 7% e a zona inerte branca

nos restantes 86%. Esta foi a única situação encontrada em que o algoritmo genético não proporcionou resultados satisfatórios.

Figura 6-50– Aeronave com ângulo de 118 graus produziu 14% de acerto.

Os resultados mostram que o AG é apropriado para uso embarcado para cálculo de rota em voo, devido ao seu rápido processamento e pouca exigência do processador. O AG foi capaz de levar o VANT até uma zona apropriada ao pousar emergencial automático com grandes chances de sucesso e que é uma ferramenta apropriada para se evitar, de forma autônoma, o sobrevoo de área habitada.

Foi verificado que o índice de acerto melhora se houver poucas opções de zonas atratoras e não houver necessidade de desvio rápido de zonas proibidas. As simulações

mostraram de forma estável que o índice atinge 100% se houver apenas uma área atratora e não houver desvios de zonas proibidas. Notou-se que o AG não converge na situação em que é impossível se evitar o sobrevoo de zona proibida, devido à proximidade e proa da aeronave no momento em que a simulação foi acionada.

As zonas geográficas podem ser embarcadas transformando as coordenadas geográficas em posição relativa à aeronave, com esta ocupando a posição central (0;0).

6.5 Conclusões

Este Capítulo apresentou um ambiente de simulação capaz de testar as soluções em diferentes situações operacionais. Os algoritmos apresentados não foram realizados para serem soluções ótimas e não devem ser avaliados como tal, o objetivo dos mesmos foi apresentar uma plataforma de simulação como banco de testes flexível e de fácil uso.

Os voos foram realizados no simulador XPlane e a máquina de estados implementada em Labview. Os estados criados visaram atender aos requisitos previamente identificados para evitar colisões em voo, sobrevoo de área proibida, mitigar problemas com sistemas internos e atitude anormal, evitar que condições meteorológicas adversas provoquem acidentes e evitar colisão com o solo em voo de cruzeiro. Algumas destas soluções usaram os dados provenientes do XPlane em subrotinas específicas no Labview em simples operações matemáticas para realizar ações corretivas (evitar choque com o solo, por exemplo), outras exigiram melhor compreensão da natureza do problema e soluções um pouco mais complexas. Para identificar situações meteorológicas adversas, foi necessário entender a perturbação causada pela atmosfera para desenvolver uma metodologia eficaz. No caso de pouso de emergência, recorreu-se a um algoritmo genético para criar uma rota até uma zona segura para pouso, evitando algumas regiões definidas.

Tendo sido estabelecido um ambiente de simulação capaz de testar as soluções em diferentes situações operacionais, o próximo capítulo apresentará os testes realizados objetivando testar as estratégias criadas.

7 Resultados da Simulação em IFA²S em Labview

O Capítulo 6 apresentou o ambiente de simulação em que o IFA²S foi implementado, onde foi descrita a integração entre o simulador XPlane e o Labview e as diversas funções implementadas em uma máquina de estados.

Este Capítulo faz uso do ambiente de simulação criado e das soluções implementadas na máquina de estados para apresentar os resultados obtidos. A organização deste Capítulo visa permitir ao leitor um entendimento dos resultados obtidos com o IFA²S em ambiente operacional simulado.

7.1 Colisão no Ar

O acompanhamento de aeronaves nas proximidades do VANT para evitar colisões requer um sistema que permita identificar a posição, velocidade e direção das mesmas e um algoritmo capaz de executar um desvio de rota oportuno. O IFA²S precisa fazer uso de algum sistema que forneça a posição, velocidade e direção das aeronaves intrusas e fazer uso de rotinas para mudança de rota de forma automatizada. Para obter o monitoramento dos intrusos, o VANT pode usar sensores especializados ou enlaces de comunicação (ADS-B ou TCAS, por exemplo).

Conforme foi verificado no Capítulo anterior, este trabalho realizou um algoritmo simplificado de mudança de rota com a finalidade de incorporá-lo à máquina de estados, não como solução otimizada. O ambiente de simulação permite simular aeronaves na área de operações, fazer com que o VANT estabeleça uma rota de colisão e execute uma mudança de rota a tempo de evitar um acidente aéreo, neste caso, a máquina de estados mostrada na Figura 7-1. Os resultados obtidos atendem as condições da máquina de estados e permitiram evitar colisões.

Os resultados e a operação do ambiente de simulação são descritos nas figuras apresentadas. O experimento consistiu de posicionar o VANT e comandar a rota de colisão de forma a testar a condição de aeronave à direita e a esquerda. Um total de 7 ocorrências de aeronaves intrusas foram consideradas, onde 3 ficavam posicionadas à direita e 4 à esquerda. Para que o experimento seja iniciado, é necessário habilitar a detecção de aeronaves intrusas

e comandar o evento de rota de colisão. Na Figura 7-2, o botão para permitir detecção de intrusos está selecionado permite a detecção de intrusos e, quando selecionado, acende-se o LED correspondente e os dados da aeronave mais próxima são apresentados na janela de alertas, à esquerda. Uma vez selecionado teste de colisão na janela de eventos, o VANT se dirige diretamente para a aeronave intrusa mais próxima (janela da direita na mesma figura). Na Figura 7-4, uma vez que a aeronave intrusa cruze os limites vertical e horizontal estabelecidos (Figura 7-3), um alerta é apresentado ao operador e a aeronave altera a rota de forma autônoma. O limites estabelecidos nesta simulação foram de 5km para alteração de rota (alerta vermelho), 10km para alerta amarelo e 3000ft de afastamento vertical. A Figura 7-5 mostra que a rota prevista na missão foi abandonada e um waypoint criado à esquerda do VANT (o avião intruso estava à direita). Uma vez evitado o choque e fora dos limites de emergência, a aeronave retorna à missão original, Figura 7-6.

Figura 7-1– A proximidade de um intruso provoca a mudança de estado para evitar colisão em voo.

De forma geral, o algoritmo utilizado para evitar as colisões em voo funcionou conforme esperado, sendo capaz de evitar a proximidade excessiva entre as aeronaves. A diferença mínima de altitude para acionamento da mudança de rota foi de 3000ft, maior portanto do que seria necessário (500ft, por exemplo), pois o objetivo era verificar a capacidade de separação horizontal. A luz de alarme amarela foi acionada para distâncias

menores do que 10km e a vermelha (com consequente mudança de rota) em 5km. Após o acionamento do alarme e consequente mudança de rota, a distância mínima ficou em média em 2,2km com 0,4km de desvio padrão, Tabela 6-1. Pode-se afirmar que a distância mínima aceitável para acionamento do algoritmo usado deve ser maior do que 4km para garantir separação mínima de 1km entre as aeronaves.

Figura 7-2— Na janela de alertas, à esquerda, o botão para permitir detecção de intrusos está selecionado, o LED correspondente aceso e os dados da aeronave mais próxima apresentados. Uma vez selecionado teste de colisão, o VANT se dirige diretamente para a aeronave intrusa mais próxima (janela da direita).

Figura 7-3— A janela de S&A permite o estabelecimento dos limites horizontal e vertical desejados, a visualização de posição das aeronaves intrusas e a eventual mudança de rota.

Figura 7-4– Uma vez que a aeronave intrusa cruze os limites vertical e horizontal estabelecidos, um alerta é apresentado ao operador e a aeronave altera a rota.

Figura 7-5– Durante a manobra para evitar colisão em voo, a rota pré-definida é abandonada e um waypoint criado para direcionamento do VANT.

Figura 7-6– Uma vez evitado o choque e fora dos limites de emergência, a aeronave retorna à missão original.

Tabela 7-1. Resultados do modo para evitar colisões em voo do IFA2S.

Posição Relativa do Intruso	Distância mínima VANT-Intruso (km)	Tempo durante manobra (s)
Direita	2,2	32
Direita	2,5	36
Direita	1,8	27
Direita	2,1	32
Esquerda	1,7	26
Esquerda	2,8	40
Esquerda	2,1	32
Média	2,2	32
Desvio Padrão	0,4	5

7.2 Sobrevoos de Área Proibida

A solução utilizada para evitar o sobrevoos de uma área proibida foi implementada e teve um sucesso relativo. A Figura 7-7 mostra os estados envolvidos no exercício. Foram realizados dez testes e a aeronave evitou o sobrevoos em 8 tentativas. Nas duas simulações em que houve entrada na zona proibida, a aeronave o fez como parte da manobra de curva e, apesar da pequena profundidade de penetração (cerca de 2km), a aeronave percorreu uma distância aproximada de 7km antes de abandonar a vertical da zona interdita.

Figura 7-7– O estado “Forbidden Area” é acionado quando a aeronave se aproxima de uma zona em que o sobrevoos é proibido.

A simulação, para o teste dos estados referentes à mudança de rota visando evitar sobrevoos de zona proibida, inicia com a permissão do operador no painel gerador de eventos, conforme Figura 7-8. Se a aeronave se aproximar das fronteiras da zona além de um limite preestabelecido (10km nas simulações), uma nova rota é gerada. Conforme visto no Capítulo anterior, a solução usada foi simples e realizada através da criação de uma nova rota, representada, neste caso, por novo e único waypoint à esquerda ou direita da aeronave, Figura 7-9 e Figura 7-10. A Figura 7-11 e Figura 7-13 mostram uma sequência de imagens contendo a rota percorrida pela aeronave para evitar a zona proibida. Uma vez que a aeronave deixa a

zona proibida, ela retorna à navegação anterior e as luzes de alerta ao operador se apagam, Figura 7-12 e Figura 7-14.

Figura 7-8– Para que o sobrevoio de Zonas Proibidas seja evitado, é necessário que o operador acione o botão “Avoid Forbidden” no painel gerador de eventos do Labview.

Figura 7-9– O estado “Forbidden Area” provoca a mudança de rota do VANT criando um waypoint auxiliar para evitar o sobrevoio da Zona Proibida e acende luzes de aviso para alertar o operador.

Figura 7-10– Novo waypoint criado para servir ao desvio de rota para evitar sobrevoio da zona proibida.

Figura 7-11– Da esquerda para a direita, sequencia da rota percorrida pela aeronave para evitar a zona proibida.

Figura 7-12– Após evitar a zona proibida, o VANT retorna à navegação anterior (direita) e apaga as luzes de aviso (esquerda).

Figura 7-13– Da esquerda para a direita, sequencia da rota percorrida pela aeronave para evitar a zona proibida.

Figura 7-14– Dois instantes evidenciando que, após evitar a zona proibida, o VANT retorna à navegação anterior e se dirige ao waypoint previamente selecionado.

7.3 Falha em Sistemas da Aeronave

O acompanhamento constante dos sistemas da aeronave realizado de forma autônoma pelo IFA²S facilita a identificação precoce de falhas para evitar falhas catastróficas e segue os estados mostrados na Figura 7-15. Conforme foi verificado, utilizaram-se na simulação apenas três sistemas para desenvolvimento das soluções: tensão e temperatura da bateria e corrente no sistema aviônico. A decisão do IFA²S dependeu dos valores medidos e dos limites estabelecidos pelo operador.

O gerador de eventos permite ao operador inserir os limites desejados para controlar as ações definidas. Estas podem ser de retorno à base, pouso de emergência ou abertura de

paraquedas (voo abortado). O XPlane não permite a criação destas falhas em seus sistemas, assim, estas foram geradas também dentro do gerador de eventos do Labview.

Figura 7-15– A falha em um dos sistemas da aeronave sob monitoramento realiza uma verificação de limites para decidir a ação.

Os testes em voo simulado mostraram boa consistência com a lógica adotada. A Figura 7-16, Figura 7-17 e Figura 7-18 mostram as ações tomadas pelo IFA²S quando o limite de retorno à base é ultrapassado. A Figura 7-16 mostra na janela da esquerda as luzes de aviso de retorno à base (amarelo) e de sistema interno (vermelho) acesas. Na janela da direita desta mesma figura, vê-se que a missão foi encerrada e o próximo waypoint contém a numeração 99, correspondente à posição da base armazenada. A Figura 7-17 mostra que, em caso de retorno à base, a rota predefinida, tabela da esquerda, é substituída pela posição da base, tabela da direita, para a navegação da aeronave. É importante ressaltar que o operador pode cancelar a ação do IFA²S de retorno à base e, neste caso, a missão original é retomada com a aeronave navegando para o waypoint original, aquele antes do comando do IFA²S. O comando de retorno à base, faz com que a aeronave navegue até as coordenadas da base. A Figura 7-18 mostra na janela da esquerda (a) a rota da aeronave até a posição da base e a realização de voo circular (*loiter*). Note que, na Figura 7-18 (a), os waypoints de navegação originais desapareceram devido à navegação possuir apenas a base como waypoint. Na

Figura 7-18 (b), a aeronave retorna à navegação original, se o comando de retorno à base for cancelado pelo operador. Neste segundo caso, os waypoints predefinidos de navegação retornaram.

Foram realizados 20 testes e em todos, 100%, o comportamento foi conforme previsto. Caso as medidas realizadas em um ou mais sistemas internos da aeronave ultrapassassem o limite estabelecido de retorno à base, a missão era encerrada e a aeronave navegava até as coordenadas da base. A altitude usada foi a mesma em que a aeronave se encontrava no momento do acionamento da ação. Uma vez que a aeronave atinge distância de 2km da base, o voo circular descendente era iniciado, modo “Loiter”, até atingir a altura de 1000ft em relação ao terreno. Na simulação, uma vez atingida a altura de 1000ft em relação ao terreno, a aeronave permanece em voo nesta altura até que haja o comando de abortar “Loiter” pelo operador disponível na janela “Event Generator”. No trajeto entre o acionamento da navegação para base e as coordenadas da mesma, o operador podia cancelar a ação automática e fazer com que a aeronave retornasse à navegação original.

Figura 7-16– Falha de sistema da aeronave com comando de retorno à Base. A janela da esquerda mostra as luzes de aviso de retorno à Base (amarelo) e de falha de sistema interno (vermelho) acesas. A janela da direita mostra que o próximo waypoint contém a numeração 99, correspondente à posição da base.

Events Base Info Environment Wpt Control Internal Instrum SBA Ground Path Flight graphs Routes Forbidden Area									
Predefined Route									
0	-23.2228	-46.3234	8000						
1	-23.802	-45.5906	7000						
2	-22.6815	-45.9174	9000						
3	-22.9878	-46.3129	7000						
4	0	0	0						
5	0	0	0						
6	0	0	0						
7	0	0	0						
8	0	0	0						
9	0	0	0						
10	0	0	0						
11	0	0	0						
12	0	0	0						
13	0	0	0						
14	0	0	0						
15	0	0	0						
16	0	0	0						
17	0	0	0						
18	0	0	0						
19	0	0	0						
20	0	0	0						
21	0	0	0						
22	0	0	0						
23	0	0	0						
24	0	0	0						
25	0	0	0						
26	0	0	0						
27	0	0	0						
28	0	0	0						
29	0	0	0						
30	0	0	0						
31	0	0	0						
32	0	0	0						
33	0	0	0						
34	0	0	0						
35	0	0	0						
36	0	0	0						
37	0	0	0						
38	0	0	0						
39	0	0	0						
40	0	0	0						
41	0	0	0						
42	0	0	0						
43	0	0	0						
44	0	0	0						
45	0	0	0						
46	0	0	0						
47	0	0	0						
48	0	0	0						
49	0	0	0						
50	0	0	0						
51	0	0	0						
52	0	0	0						
53	0	0	0						
54	0	0	0						
55	0	0	0						
56	0	0	0						
57	0	0	0						
58	0	0	0						
59	0	0	0						
60	0	0	0						
61	0	0	0						
62	0	0	0						
63	0	0	0						
64	0	0	0						
65	0	0	0						
66	0	0	0						
67	0	0	0						
68	0	0	0						
69	0	0	0						
70	0	0	0						
71	0	0	0						
72	0	0	0						
73	0	0	0						
74	0	0	0						
75	0	0	0						
76	0	0	0						
77	0	0	0						
78	0	0	0						
79	0	0	0						
80	0	0	0						
81	0	0	0						
82	0	0	0						
83	0	0	0						
84	0	0	0						
85	0	0	0						
86	0	0	0						
87	0	0	0						
88	0	0	0						
89	0	0	0						
90	0	0	0						
91	0	0	0						
92	0	0	0						
93	0	0	0						
94	0	0	0						
95	0	0	0						
96	0	0	0						
97	0	0	0						
98	0	0	0						
99	0	0	0						
100	0	0	0						
101	0	0	0						
102	0	0	0						
103	0	0	0						
104	0	0	0						
105	0	0	0						
106	0	0	0						
107	0	0	0						
108	0	0	0						
109	0	0	0						
110	0	0	0						
111	0	0	0						
112	0	0	0						
113	0	0	0						
114	0	0	0						
115	0	0	0						
116	0	0	0						
117	0	0	0						
118	0	0	0						
119	0	0	0						
120	0	0	0						
121	0	0	0						
122	0	0	0						
123	0	0	0						
124	0	0	0						
125	0	0	0						
126	0	0	0						
127	0	0	0						
128	0	0	0						
129	0	0	0						
130	0	0	0						
131	0	0	0						
132	0	0	0						
133	0	0	0						
134	0	0	0						
135	0	0	0						
136	0	0	0						
137	0	0	0						
138	0	0	0						
139	0	0	0						
140	0	0	0						
141	0	0	0						
142	0	0	0						
143	0	0	0						
144	0	0	0						
145	0	0	0						
146	0	0	0						
147	0	0	0						
148	0	0	0						
149	0	0	0						
150	0	0	0						
151	0	0	0						
152	0	0	0						
153	0	0	0						
154	0	0	0						
155	0	0	0						
156	0	0	0						
157	0	0	0						
158	0	0	0						
159	0	0	0						
160	0	0	0						
161	0	0	0						
162	0	0	0						
163	0	0	0						
164	0	0	0						
165	0	0	0						
166	0	0	0						
167	0	0	0						
168	0	0	0						
169	0	0	0						
170	0	0	0						
171	0	0	0						
172	0	0	0						
173	0	0	0						
174	0	0	0						
175	0	0	0						
176	0	0	0						
177	0	0	0						
178	0	0	0						
179	0	0	0						
180	0	0	0						
181	0	0	0						
182	0	0	0						
183	0	0	0						
184	0	0	0						
185	0	0	0						
186	0	0	0						
187	0	0	0						
188	0	0	0						
189	0	0	0						
190	0	0	0						
191	0	0	0						
192	0	0	0						
193	0	0	0						
194	0	0	0						
195	0	0	0						
196	0	0	0						
197	0	0	0						
198	0	0	0						
199	0	0	0						
200	0	0	0						
201	0	0	0						
202	0	0	0						
203	0	0	0						
204	0	0	0						
205	0	0	0						
206	0	0	0						
207	0	0	0						
208	0	0	0						
209	0	0	0						
210	0	0	0						
211	0	0	0						
212	0	0	0						
213	0	0	0						
214	0	0	0						
215	0	0	0						
216	0	0	0						
217	0	0	0						
218	0	0	0						
219	0	0	0						
220	0	0	0						
221	0	0	0						

7.4 Atitude Anormal

A Figura 7-19 mostra os estados envolvidos em caso de atitude anormal da aeronave em relação aos eixos de rolamento e arfagem. Foram realizadas 20 simulações e estas demonstraram maior sensibilidade da aeronave às perturbações no ângulo de rolamento em relação ao ângulo de arfagem. Nenhum experimento provocou alteração suficiente no ângulo de arfagem para a mudança de estado. O estado “*AbA*” (Atitude Anormal) foi executado com frequência durante os testes de turbulência atmosférica e forneceu os resultados esperados, ou seja, evitou ângulos excessivos e a perda de controle. Contudo, por ser um estado transitório (1 a 2 segundos) e por retornar rapidamente ao estado anterior, não foi realizada nenhuma métrica para verificação de sua efetividade.

Figura 7-19– Se o ângulo de rolamento ou de arfagem exceder os limites estabelecidos, o estado “*AbA*” realiza a correção da atitude e toma a decisão de retornar ao estado anterior ou abortar a missão.

7.5 Turbulência Atmosférica

O Capítulo 6 apresentou as medidas realizadas alterando as condições de turbulência no eixo longitudinal e vertical. Estas medidas serviram ao entendimento dos efeitos das mesmas na aeronave e permitiram o desenvolvimento de um processo de identificação. A turbulência no eixo longitudinal pode ser identificada através de variação no ângulo de rolamento e a vertical através das variações provocadas na velocidade vertical. No entanto, alterações no regime de voo podem provocar alterações nestes parâmetros e serem erroneamente identificadas com turbulência atmosférica. A mudança brusca de altitude para evitar o choque com o solo ou uma curva para evitar a colisão em voo são exemplos de medidas para evitar acidentes que podem ser confundidas com os efeitos da meteorologia.

Para diminuir falsos alarmes provenientes das medidas isoladas de variação da velocidade vertical e de ângulo de rolamento, fez-se com que o alarme de turbulência atmosférica estivesse condicionado à ocorrência de ambos os efeitos simultaneamente, estado “*Bad Weather*” conforme Figura 7-20. A mudança de estado ocorreu somente quando habilitado pelo operador e um certo número de ocorrências fosse contabilizado. Os testes buscaram verificar a ocorrência de mudança de estados conforme as condições atmosféricas e uma métrica de validação de resultados foi realizada. As simulações, neste caso específico, foram baseadas em tempo de voo em que a aeronave ficou submetida às condições atmosféricas selecionadas. Foram realizadas 4 horas e trinta minutos, sendo que, as quatro primeiras horas para os níveis de turbulência W0, W1, W2 e W3 e os últimos trinta minutos foram dedicados ao nível W4 de turbulência. Os 30 minutos em W4 foram resultantes de diversas tentativas, todas resultando em perda de controle da aeronave e queda no solo.

Figura 7-20– As medidas de desvio padrão da velocidade vertical e rolamento permitem a identificação de turbulência atmosférica, forçam a mudança de estado e auxiliam na tomada de decisão.

A Figura 7-21 e a Figura 7-22 apresentam os parâmetros modificados no XPlane para simular condições atmosféricas com intensidades diferentes, classificadas na análise como 1 e 2, respectivamente. Os voos de teste realizados seguiram a rota apresentada na Figura 7-23 e consideraram as condições 1, 2 e 3. A condição 0 não foi usada por não apresentar condição atmosférica adversa e não provocar mudança de estado. A condição 4 se mostrou demasiado turbulenta e nenhum dos voos de teste chegou ao final sem haver entrado no estado de “*Atitude Anormal*” e abertura do paraquedas (voo abortado). Assim, considerou-se como voo turbulento suficiente para retorno à base aqueles classificados como 2 ou 3.

Figura 7-21– Condições de turbulência nível 1 inserida no XPlane para teste do mecanismo de identificação de turbulência criado no Labview.

Figura 7-22– Condições de turbulência nível 2 inserida no XPlane para teste do mecanismo de identificação de turbulência criado no Labview.

Figura 7-23– Rota percorrida pela aeronave durante os testes de turbulência com duração de 1 hora.

Para apoio à decisão, três níveis foram considerados para o desvio padrão de velocidade vertical (500, 1000, e 1500) e quatro níveis para o desvio padrão do ângulo de rolamento (0,010, 0,015, 0,020, e 0,025). A Tabela 7-2 e a Figura 7-24 mostram o tempo em minutos necessário para a detecção de turbulência e alteração dos níveis em função dos limites estabelecidos para os desvios padrão do ângulo de rolamento e da velocidade vertical, sendo necessárias 20 ocorrências para a transição do estado "*Idle*" para "*Return Home*". Tendo em conta esta Tabela, para voos subsequentes de teste, considerou-se 0,020 e 800 para o desvio padrão ângulo de rolamento e de velocidade vertical, respectivamente, e foi encontrada uma média de 17 min em cinco ensaios para o estado "*Return Home*" ser acionado, tendo sido inserido o nível W3 de turbulência.

Outro resultado para estes testes voos foi perceber que a aeronave foi muito mais sensível ao ângulo de rolamento do que em relação à variação de velocidade vertical. O sistema de controle estava limitado ao ângulo de rolamento de 40 graus, mas instabilidades atmosféricas provocaram valores mais elevados, dependendo da sua intensidade. De forma geral, os ângulos máximos de rolamento aumentaram com turbulência, conforme Tabela 7-3. Para evitar perda de controle, o estado "*Atitude Anormal*" foi acionado em média por 1-2 segundos em 20 testes controlados quando a aeronave atravessou o limite de 60 graus de ângulo de rolamento para estabilizar tanto asas posição (posição horizontal) e ângulo de inclinação (zero grau). Todas as tentativas de usar o nível W4 resultaram no estado "*Abort Flight*" com a consequente abertura do paraquedas (mais de 80 graus de ângulo de

rolamento). Considerando que os testes de voo não identificaram W0 e W1 como ameaças para a segurança, o sistema considerou voo turbulento suficiente para retornar à base aqueles classificados como W2 ou W3. Isto significa, apenas a W2 e W3 foram capazes de provocar a transição para o estado "*Return Home*".

Tabela 7-2. Tempo para identificação de condição atmosférica adversa com variação dos limites mínimos de desvio padrão (SD) da velocidade vertical e do ângulo de rolamento.

	SD da velocidade vertical (m/s)								
	500			1000			1500		
SD Roll	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
0,015	51	7	3	51	27	5	-	31	44
0,020	-	7	4	-	-	19	-	-	44
0,025	-	14	4	-	-	19	-	-	44

Figura 7-24– Tempo para identificação de condição atmosférica adversa.

Tabela 7-3. Medida de número de eventos para diferentes condições atmosféricas com variação dos limites máximos de ângulo de rolagem e de desvio padrão em altitude.

Roll	500			1000			1500		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
40	6	125	147	0	56	85	0	30	47
45	0	74	84	0	38	53	0	19	30
50	0	29	49	0	20	28	0	11	18
55	0	21	28	0	14	14	0	7	10

7.6 Recuperação Automática de Baixa Altitude

O sistema implementado no Labview faz uso dos dados de altitude da aeronave e do terreno provenientes do XPlane, através do estado “Alt”, conforme Figura 7-25. Uma comparação constante destes dois valores é realizada durante o voo nos estados “Idle”, “Back Home” e “Loiter” e, em caso da distância da aeronave ao solo ser inferior a 1.500ft, o modo de recuperação permitiu evitar uma colisão catastrófica com o solo. A Figura 7-26 mostra a altura da aeronave durante um teste de 58 min onde o estado “Alt” foi acionado 18 vezes. A altitude mínima medida foi de 1430 ± 45 ft e evitou colisões com o solo mesmo em voos sobre terreno montanhoso.

Figura 7-25– O estado “Alt” é acionado sempre que a altura da aeronave em relação ao solo estiver abaixo do limite previsto.

O modo de recuperação de altitude abandona a missão em curso e coloca a aeronave em atitude de recuperação. Conforme foi visto anteriormente, as asas são niveladas e a aeronave inicia voo ascendente com máxima potência aplicada no motor. A Figura 7-27 mostra imagens do XPlane com a aeronave iniciando a recuperação de altitude (esquerda) e em ascensão (direita), assim como o painel de alerta indicando a ação corretiva ao operador (centro).

Figura 7-26– O estado “Alt” foi acionado sempre que a altura da aeronave em relação ao solo fosse menor que 1.500ft.

Figura 7-27– O estado “Alt” permite a recuperação automática de baixa altitude a partir dos estados “Idle”, “Return Home” e “Loiter”.

7.7 Pouso de Emergência usando Algoritmos Genéticos

O Capítulo 6 apresentou o uso de um Algoritmo Genético (AG) para cálculo automático de rota. Os resultados encontrados permitiram prosseguir com seu uso como parte do IFA²S programado no Labview, sendo aplicado como parte do estado “*Emerg*” como foi verificado. Neste Capítulo, o AG para cálculo de rota é iniciado pelo Labview e faz uso de dados da aeronave (proa e velocidade) obtidos a partir do XPlane. As zonas usadas no Capítulo 6 serão as mesmas (ZNN, ZFL e ZAT) e nenhuma relação de realidade existe com o ambiente circundante à aeronave. O objetivo foi verificar a compatibilidade do AG desenvolvido com as condições operacionais do VANT usando o ambiente de simulação criado.

Para facilitar o entendimento, repete-se aqui a definição das zonas usadas no AG:

- **ZNN:** Zonas em que existem concentrações excessivas de pessoas e a aeronave não pode sobrevoar;
- **ZFL:** Zonas sem pessoas e construções, mas com características topográficas não completamente adequadas a um pouso de emergência; e
- **ZAT:** Zonas apropriadas para pouso em emergência automático.

Figura 7-28– O algoritmo genético é usado para cálculo automático de rota em voo.

De forma geral, os resultados mostram um sucesso parcial no uso do AG. De um lado, em menos de um segundo, a máquina de estados fez com que o algoritmo fosse capaz de gerar a nova rota, de inseri-la como válida no Labview e de fazer com que o VANT percorresse os waypoints definidos. Por outro, não foi inserido um mapa dinâmico do Labview de forma a permitir testes mais realistas do ponto de vista de fazer com que a aeronave de fato tivesse consciência do terreno ao seu redor. Esta capacidade é importante para um VANT, mas não faz parte dos objetivos deste trabalho, assim, não foi inserida nas simulações. Estudos futuros poderão ser realizados neste sentido.

A Figura 7-29, Figura 7-30 e Figura 7-31 mostram as rotas calculadas pelo AG, considerando as zonas predefinidas, à esquerda, e as realizadas pelo Labview, à direita. O AG fornece os waypoints da nova rota em distância relativa ao VANT em metros e o Labview transforma estas distâncias em coordenadas geográficas. A solução realizou o pouso em menos de três minutos e buscou, ao mesmo tempo, evitar as zonas definidas como ZNN com somente cinco pontos de navegação (waypoints). A condição apontada pela Figura 7-29 torna difícil evitar a zona n2 (ZNN), devido a velocidade do avião, a sua proximidade com a zona e a sua direção no momento de acionamento do AG. A Figura 7-30 mostra uma condição em que o AG teve sucesso ao alcançar a zona b2 (ZAT), mas falhou por gerar uma rota que sobrevoa uma pequena parte da zona n2. A Figura 7-31 mostra uma situação em que o AG conseguiu evitar sobrevoos da ZNN n1 e seguir na direção da ZAT b1, mas o desvio não permitiu que a aeronave alcançasse dentro do tempo máximo estabelecido (3 min).

Figura 7-29– Rota calculada pelo AG (esquerda) e realizada pelo Labview (direita), sendo 100 graus a proa inicial da aeronave e considerando as zonas predefinidas.

Figura 7-30– Rota calculada pelo AG (esquerda) e realizada pelo Labview (direita), sendo 90 graus a proa inicial da aeronave e considerando as zonas predefinidas.

Figura 7-31– Rota calculada pelo AG (esquerda) e realizada pelo Labview (direita), sendo 350 graus a proa inicial da aeronave e considerando as zonas predefinidas.

7.8 Conclusões

O presente Capítulo apresentou os resultados obtidos com o uso do IFA²S, implementado no Labview, a partir dos dados fornecidos pelo simulador de voo XPlane. De forma geral, os resultados da simulação atenderam ao objetivo de evitar as situações identificadas e diminuiram os riscos identificados como requisitos de segurança. As falhas em sistemas da aeronave foram criadas dentro do Labview e a máquina de estados se comportou como deveria, isto é, retornou à Base ou abandonou a missão através de pouso em emergência ou de abertura de paraquedas (feito através de aviso ao operador). O VANT foi capaz de evitar a aproximação excessiva de outra aeronave, mas a solução adotada se

mostrou limitada devido à distância necessária para iniciar a manobra evasiva e devido à falta de atenção a outros elementos, como outras aeronaves e zonas proibidas no solo. A identificação precoce de turbulência se mostrou consistente com o esperado e foi feita de forma satisfatória, pois conseguiu identificar turbulências com baixo nível de falso alarme. O modo de recuperação de baixa altitude mostrou resultados satisfatórios e conseguiu evitar o choque com o solo em todas as simulações. O processo de usar um AG para cálculo de rota em voo para pouso em emergência mostrou resultados satisfatórios, mas demanda a adição de um mapa dinâmico refletindo a situação circundante à aeronave. O IFA²S simulado conseguiu evitar, de forma satisfatória, o sobrevoo da zona proibida nesse caso, mas o cálculo de rota ainda pode ser melhor elaborado.

8 Avaliação Quantitativa do Impacto do IFA²S no Risco Operacional dos VANTs

O mercado militar e civil têm amplas aplicações para VANTs, mas dificuldades com certificação impedem o uso de VANTs nas operações. A situação se agrava no das aeronaves de pequeno porte (menor que 25kg) devido ao uso de dispositivos e componentes COTS (*Commercial Off-The Shelf*), sem valor de confiabilidade definido e, muitas vezes, provenientes de aeromodelos recreativos.

Nos capítulos anteriores, foram verificadas simulações e testes com o sistema IFA²S, definido a partir de requisitos gerados pelo STPA. Neste Capítulo, será verificado o impacto que o IFA²S tem na probabilidade de danos a seres humanos e construções. Para tanto, será realizado um maior aprofundamento na determinação da taxa de falhas λ de uma aeronave usando uma combinação das técnicas FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) e FTA (*Fault Tree Analysis*) em um sistema sem valores determinados de confiabilidade de componentes. O objetivo da combinação das técnicas foi permitir a identificação das falhas e, ao mesmo tempo, a identificação dos componentes que poderiam provocá-las, tal como descrito em (YU, YANG, *et al.*, 2011). Em seguida, será apresentada uma metodologia para avaliar a mudança na taxa de acidentes com pessoas e edifícios com uso do IFA²S.

8.1 FMEA e FTA

Neste item o sistema será analisado através de uso das técnicas FMEA e FTA para análise quantitativa de falhas. A FTA analisa os efeitos de possíveis falhas, mas desconsidera componentes. Estes serão incluídos neste item de forma semelhante a usada pela FMEA e, por simplicidade, a árvore criada será chamada daqui por diante de FTA.

Partindo do sistema como um todo, faz-se a divisão de seus sistemas e subsistemas até que sejam atingidos os componentes para os quais o analista possa associar falhas e suas respectivas probabilidades de ocorrência. Os diversos componentes se agregam para a formação de subsistemas e esses para a formação de outros subsistemas maiores, criando um tronco convergente para o sistema completo. No sentido contrário, galhos e ramificações

cada vez mais numerosas à medida que se dirige para o nível de componentes, (ERICSON, 1999). A partir da FTA e usando os valores de probabilidade de falha de componentes, a álgebra booleana pode ser utilizada para avaliar a probabilidade do sistema e para identificar os elementos mais críticos para a ocorrência de uma falha em voo visando a adição de elementos mitigadores ou redundantes.

Os diversos elementos da FTA estão relacionados por portas OU (*OR*) ou E (*AND*). Uma análise de álgebra booleana nos permite inferir as diferenças entre portas E e OU na formação de uma FTA e a PdF (Probabilidade de Falha) do sistema. De forma geral, os elementos de um mesmo nível se combinam com o uso de portas OU, bastando a falha de um deles para provocar a do nível acima. A presença de portas E indica que a falha de um nível necessita da falha de todos os níveis abaixo, identificando-se assim a presença de redundância no sistema ou de um sistema supervisor. Em termos práticos, a falha de um componente é suficiente para a falha do nível acima, se ele está relacionado a outros elementos por meio de uma porta OU. No caso de uma porta E, é necessário que todos os elementos associados falhem para que haja falha do sistema do nível acima.

Como exemplo, pode-se considerar que dois elementos, A e B, com PdF respectivos p_A e p_B , associando-se para formar um elemento C, um nível acima, por meio de portas E e OU, conforme Figura 8-1. As equações (8.1) e (8.2) apresentam respectivamente as relações matemáticas para os casos E e OU. Assumindo como exemplo que, conforme informado pelo fabricante, o elemento A não falhe em um período de 500 horas e o B não falhe em um período de 200 horas, neste caso, $p_A = 1/500 = 0,002$ e $p_B = 1/200 = 0,005$. Assim, nesse caso específico, a probabilidade de falha do sistema C será $p_C = 0,00001$ ($1,0 \cdot 10^{-5}$), se a porta for E, e será $p_C = 0,00699$ ($\sim 7,0 \cdot 10^{-3}$), se a porta for OU. Nota-se que a probabilidade de falha do sistema C é quase 700 vezes maior, se a porta usada for OU. Sob outro ponto de vista, o uso de uma porta E permitiu um decréscimo significativo na probabilidade de falha do sistema C (A e B devem falhar para que C falhe) e, por essa razão, redundâncias são comumente usadas em sistemas críticos, sendo um sistema crítico definido como aquele cuja falha resulta em falha catastrófica do sistema ou em perda de vidas.

Figura 8-1– Em uma FTA, dois elementos A e B podem relacionar por meio de portas E (figura i) ou de portas OU (figura ii).

$$p_A \text{ E } p_B = p_A * p_B \quad (8.1)$$

$$p_A \text{ OU } p_B = p_A + p_B - p_A * p_B \quad (8.2)$$

A partir desse exemplo, podemos seguir para outro mais próximo da realidade aeronáutica. A Figura 8-2 apresenta um exemplo de árvore de falhas de um VANT hipotético. Nela, três situações foram consideradas para a perda do piloto automático: falha de *hardware* do processador, uma falha séria do *software* embarcado ou uma falha combinada de *software*. Uma falha combinada pode ser detectada e corrigida por meio de um sistema de segurança chamado *watchdog timer*. Esse sistema de segurança é posicionado como redundante às falhas eventuais, significando que falhas menores de *software* somente poderão comprometer o funcionamento do piloto automático da aeronave, se houver também a falha do *watchdog timer*. Para sistemas mais complexos, uma análise de viabilidade econômica e de sensibilidade poderia levar à conclusão de que são necessários dois ou mais pilotos automáticos trabalhando de forma redundante para que haja a necessária confiabilidade ou, em outras palavras, para que a PdF seja baixa o suficiente.

No caso apresentado na Figura 8-2, tem-se uma porta E com dois componentes, resultando em um elemento que se compõe com outros dois para formar o elemento “falha do piloto automático”, por meio de uma porta OU. Se uma falha eventual menor de *software* ocorre a cada 200 horas de voo ($p_s = 5,0.10^{-3}$) e uma falha no *watchdog timer* ocorre a cada 1000 horas de voo ($p_w = 1,0.10^{-3}$), então uma falha combinada de *software* terá $p_{sc} = 5,0.10^{-6}$. Se uma falha de *hardware* do processador e uma falha séria de *software* ocorrer a cada 4000 horas, então, respectivamente, terão $p_{hw} = p_{sw} = 2,5.10^{-4}$. Para que ocorra uma falha no piloto

automático, significando a perda de controle da aeronave, basta que apenas um desses eventos ocorra (falha combinada de *software*, falha no processador ou falha séria de *software*), pois eles relacionam-se por uma porta OU. A equação (3) pode ser usada na obtenção da probabilidade de falha do piloto automático, $p_{PA} = 5,0. 10^{-4}$.

$$p_{PA} = p_{sc} + p_{hw} + p_{sw} - p_{sc} * p_{hw} - p_{sc} * p_{sw} - p_{hw} * p_{sw} + p_{sc} * p_{hw} * p_{sw} \quad (8.3)$$

Figura 8-2– Exemplo hipotético de árvore de falhas de um piloto automático de um VANT. (MURTHA, 2009)

8.2 Teoria da Evidência de Dempster-Shafer

Conforme visto até o momento, é comum que os pequenos VANTs não possuam MTBF dos componentes empregados necessários à análise quantitativa de confiabilidade do sistema e seu consequente risco à segurança. Na indústria aeronáutica, peças são ensaiadas de forma sistemática para que se possa estimar o tempo necessário de falha. Assim, apesar de ser impossível a determinação do tempo exato em que uma falha irá ocorrer, estimativas estatísticas permitem uma aproximação suficiente para que se cumpram as exigências e os limites de segurança. Incertezas são tratadas com ferramentas estatísticas na análise de sistemas para a melhor estimativa possível a partir dos dados disponíveis.

No universo das pequenos VANTs, as incertezas são chamadas epistêmicas porque inexistem informações suficientes de taxa de falha para uma estimativa estatística nos moldes comumente usados na indústria aeronáutica. Uma metodologia de abordagem de incertezas epistêmicas é fornecida pela Teoria da Evidência, ou de Dempster-Shafer, como também é conhecida. Essa teoria foi inicialmente desenvolvida por Arthur P. Dempster (DEMPSTER, 1968) e Glenn Shafer (SHAFER, 1976), na década de 1960, como uma alternativa para o cálculo probabilístico tradicional. De fato, a Teoria da Evidência encontrou, recentemente, boa receptividade com o incremento das capacidades computacionais, como citado por (AGARWAL, RENAUD, *et al.*, 2004). (AGARWAL, RENAUD, *et al.*, 2004), demonstram o uso de ferramentas computacionais para tratar a avaliação quantitativa de risco e mantém, assim como este trabalho, as definições de incertezas, epistêmicas e estatísticas, encontradas em (OBERKAMPF, HELTON e SENTZ, 2001), (OBERKAMPF, DIEGERT, *et al.*, 1998) e (OBERKAMPF, DELAND, *et al.*, 1999). Cabe ressaltar que (ENDSLEY, 1988) também utiliza as mesmas definições na aplicação desses conceitos em pequenos VANTs e salienta diversos aspectos interessantes, como os meios para a obtenção de dados mais acurados e necessários à diminuição da incerteza epistêmica.

A árvore de falhas é útil à propagação das PdF incertezas aleatórias de componentes (MTBF), mas, no caso de incertezas epistêmicas, o uso de álgebra booleana propagaria um valor inerentemente desconhecido ou incerto. Nesse caso, a Teoria da Evidência é uma saída para a superação dessa dificuldade e para a obtenção de um valor quantitativo de probabilidade de falha para a aeronave. De acordo com (JACOB, DUBOIS e CARDOSO, 2012), há poucas aplicações da Teoria da Evidência para árvore de falhas. Outra possibilidade no caso de incerteza epistêmica é o uso de simulação Monte-Carlo, porém este trabalho não analisa esse caso, por considerar a Teoria da Evidência mais interessante ao usar árvore de falhas. O leitor pode, não obstante, encontrar clara descrição dessa abordagem no artigo de Murtha (2009).

Ao invés vez de usar números precisos, Murtha faz uso de funções de confiança, equações 8.4, 8.5 e 8.6, para avaliar dados imprecisos de dispositivos (incerteza epistêmica). Nessa abordagem, como inexistem dados experimentais confiáveis, usam-se informações derivadas de experiências pessoais para se estabelecer um intervalo (em vez de um único

número) e uma massa m (credibilidade) derivada do nível de credibilidade sobre a faixa fornecida pelo(s) especialista(s). De Murtha (2009):

$$m: X \rightarrow [0,1] \quad (8.4)$$

$$\sum_{x \in X} m(x) = 1 \quad (8.5)$$

$$\sum_{A \subseteq X} m(A) = 1, \quad (8.6)$$

onde x é a variável desconhecida que usa a variável aleatória X como estimativa de valor.

O conjunto A é composto por todos os valores possíveis de X e a massa m é um valor atribuído a todos os possíveis X . A massa m é a incerteza do valor da variável x e é atribuída por um especialista. A Equação (8.4) informa que m está no intervalo entre 0 e 1 e as Equações (8.5) e (8.6) mostram que a soma de todos os possíveis valores de m resulta sempre em 1. A Equação (8.5) mostra que todos os valores possíveis da variável x estão contidos pelo conjunto das variáveis aleatórias X , modelo probabilístico, portanto. Por outro lado, a Equação (8.6) mostra que a Teoria de Dempster-Shafer assume que a soma de todas as probabilidades da variável x estar em certo intervalo é 1. Nem sempre a Teoria de Dempster-Shafer atenderá a Equação (8.5), portanto.

Por exemplo, em caso de um especialista atribuir que uma eventual falha do software pode ocorrer entre 300 e 500 horas de voo e que o *watchdog* empregado nesse VANT hipotético pode falhar entre 1000 e 2000 horas de voo, o limite inferior e superior dos limites PdFs são 0,0020 (1/500) e 0,0033 (1/300) para eventual falha de software e 0,0005 (1/2000) e 0,0010 (1/1000) para falha do *watchdog*. Uma vez que existe somente a opinião de um único especialista, a massa é definida como 1. Se houvessem mais especialistas, cada um daria a sua opinião, que seria traduzida como massa m , e a soma de todas as massas individuais seria 1. Fazendo cálculos PdF, os novos limites inferior e superior, considerando que temos uma relação com porta E (Figura 8-2), tornam-se $1,0 \cdot 10^{-6}$ e $3,3 \cdot 10^{-6}$ (eram $2,0 \cdot 10^{-3}$ e $3,3 \cdot 10^{-3}$). Nesse caso, há uma faixa de confiabilidade e não mais um valor único. Nesse cenário, tem-se um valor otimista, um valor pessimista e uma crença associada a essa faixa de valores. Na teoria de evidência, denomina-se o pior cenário de plausibilidade (P), o melhor de crença (B , do inglês *belief*) e a confiança nesses limites de massa m . Como a soma de

todas as massas deve ser 1, havendo apenas um especialista, a massa m terá sempre o valor unitário; havendo dois ou mais especialistas, a soma das massas atribuídas a cada um deles deve somar 1 (um) (0,7 e 0,3, por exemplo). Nesse sentido, a cada elemento são necessários 3 números, conforme a Equação (7).

$$\text{Elemento} = \{P, B, m\} \quad (8.7)$$

A Equação (8.7) mostra que a taxa de falhas de certo componente ou sistema é expressa em forma de faixa de valores (P e B), e não de um valor único, e que existe uma incerteza associada a esta faixa (representada por m). Assim, são estabelecidos os limites mínimo e máximo da probabilidade de falha de certo elemento e o quanto se acredita nesta faixa. Como o fabricante não fornece o valor da taxa de falhas do componente ou sistema, os valores de P , B e m devem ser estabelecidos por especialistas diversos. Cada especialista consultado fornecerá os limites mínimo (plausibilidade, P) e máximo (crença, B) em que ele acredita está a probabilidade de falha de certo sistema e a nossa confiança na opinião do mesmo é representada pela massa m . Logo, acredita-se com m de certeza de que a probabilidade de falha de um certo componente ou sistema (PdF) está entre os valores P e B .

Estendendo o exemplo, faz-se a atribuição de valores hipotéticos aos elementos da Figura 8-2 e a representação gráfica para a probabilidade de falha de software (p_s) apresentada na Figura 8-3 usando mais de um especialista para avaliar a taxa de falhas dos componentes. A Figura 8-3 mostra que dois especialistas foram consultados e que cada um forneceu faixas diferentes para a p_s de uma aeronave, valores limites no eixo das abscissas. A Figura mostra também que a crença na opinião destes especialistas difere e esta é representada através da altura da figura entre os valores limites, $m=0,7$ para o especialista 1 e $m=0,3$ para o especialista 2.

Figura 8-3— Representação gráfica dos limites inferior e superior para a falha do tipo eventual de software p_s , sendo plausibilidade (P) o inferior e a crença (B) o superior.

No grupo de Equações (8.8), tem-se a visualização dos valores mínimos (plausibilidade, P) e máximos (crença, B) e a confiança nesses dados (massa m). A partir desses dados, pode-se levantar a PdF para o sistema representado por meio da árvore de falhas, propagando a faixa de incerteza (plausibilidade P e crença B) e a crença na opinião dos especialistas (massa m) por meio de portas E ou OU.

$$\begin{aligned}
 p_s &= \{0,0020; 0,0033; 0,7\} = \{p_{11}; b_{11}; ms_1, \\
 &\quad \{0,0015; 0,0028; 0,3\} = \{p_{12}; b_{12}; ms_2\}, \\
 p_w &= \{0,0005; 0,0010; 0,7\} = \{p_{21}; b_{21}; mw_1, \\
 &\quad \{0,0007; 0,0013; 0,3\} = \{p_{22}; b_{22}; mw_2\}, \\
 p_{hw} &= \{0,00015; 0,00025; 0,7\} = \{p_{31}; b_{31}; mhw_1, \\
 &\quad \{0,00010; 0,00035; 0,3\} = \{p_{32}; b_{32}; mhw_2\}, \\
 p_{sw} &= \{0,00025; 0,00030; 0,7\} = \{p_{41}; b_{41}; msw_1, \\
 &\quad \{0,00015; 0,00030; 0,3\} = \{p_{42}; b_{42}; msw_2\}.
 \end{aligned} \tag{8.8}$$

Conforme apresentado na Figura 8-2, os elementos constituintes do piloto automático relacionam-se por meio de portas E e OU . A propagação por meio das portas da árvore exige considerar as faixas de valores de confiabilidade e crenças associadas aos elementos. No exemplo, a falha eventual de software possui dois elementos relacionados por meio de porta E . Assim, faz a operação $p_s E p_w = p_s * p_w$. Contudo, se a relação fosse por meio de porta OU , a operação correta seria $p_s OU p_w = p_s + p_w - p_s * p_w$. No grupo de Equações (8.9), apresenta-se p_{sc} como resultado da incerteza de confiabilidade em seus elementos componentes, p_s e

p_w , relacionados por meio de uma porta E e com valores identificados no grupo de Equações (8.8). Nota-se ainda que a soma das massas permaneça 1 para p_{Ts} .

$$\begin{aligned}
 p_{TLsc} &= \begin{cases} p_{TL1sc} = p_{11} * p_{21} = 1,00.10^{-6}; \\ p_{TL2sc} = p_{11} * p_{22} = 1,40.10^{-6}; \\ p_{TL3sc} = p_{12} * p_{21} = 7,50.10^{-7}; \\ p_{TL4sc} = p_{12} * p_{22} = 1,05.10^{-6}; \end{cases} \\
 p_{TUsc} &= \begin{cases} p_{TU1sc} = b_{11} * b_{21} = 3,30.10^{-6}; \\ p_{TU2sc} = b_{11} * b_{22} = 4,29.10^{-6}; \\ p_{TU3sc} = b_{12} * b_{21} = 2,80.10^{-6}; \\ p_{TU4sc} = b_{12} * b_{22} = 3,64.10^{-6}; \end{cases} \\
 m_{Tsc} &= \begin{cases} m_{T1sc} = ms_1 * mw_1 = 0,7 * 0,7 = 0,49; \\ m_{T2sc} = ms_1 * mw_2 = 0,7 * 0,3 = 0,21; \\ m_{T3sc} = ms_2 * mw_1 = 0,3 * 0,7 = 0,21; \\ m_{T4sc} = ms_2 * mw_2 = 0,3 * 0,3 = 0,09. \end{cases}
 \end{aligned}
 \Rightarrow
 \begin{aligned}
 p_{Tsc} &= \begin{cases} \{1,00.10^{-6}; 3,30.10^{-6}; 0,49\}; \\ \{1,40.10^{-6}; 4,29.10^{-6}; 0,21\}; \\ \{7,50.10^{-7}; 2,80.10^{-6}; 0,21\}; \\ \{1,05.10^{-6}; 3,64.10^{-6}; 0,09\}; \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad (8.9)$$

Tabela 8-1. Valores de Plausibilidade (P), Crença (B) e Massa (m) obtidos a partir das Equações (8.9).

PdF Plausibilidade	PdF Crença	Massa	Probabilidade
$7,50.10^{-7}$	$2,80.10^{-6}$	0,21	0,21
$1,00.10^{-6}$	$3,30.10^{-6}$	0,49	0,70
$1,05.10^{-6}$	$3,64.10^{-6}$	0,09	0,79
$1,40.10^{-6}$	$4,29.10^{-6}$	0,21	1,00

A partir dos valores obtidos no grupo de Equações (8.9), pode-se traçar o gráfico de Atribuição de Probabilidade Básica (APB), ou *Basic Probability Assignment* (BPA) em inglês, Figura 8-4. A APB apresentada graficamente indica de forma intuitiva a faixa de confiabilidade do sistema. Lembrando que pequenos valores de PdF implicam em sistemas mais confiáveis e que maiores valores em menos confiáveis, pode-se afirmar que, com os dados disponíveis, a probabilidade de falha do exemplo é maior do que $1,40.10^{-6}$ (Tabela 8-1 e Figura 8-4) e menor do que $4,29.10^{-6}$, com 100% de certeza. Se valores menores de certeza forem aceitáveis, 79% por exemplo, pode-se afirmar que a probabilidade de falha desse

sistema está entre $1,05.10^{-6}$ e $3,64.10^{-6}$. Fora desses limites, nada pode ser afirmado. Resta, nesse caso, estabelecer requisitos de confiabilidade para que seja aceito o sistema em análise ou que se busquem formas de melhorá-lo, seja por meio de troca por um mais confiável, seja por meio de uso de redundância.

A partir do valor de confiabilidade do sistema, pode-se avaliar de forma quantitativa o risco oferecido à segurança de voo. A análise quantitativa de confiabilidade é necessária como um dos fatores que podem provocar um pouso sem controle e eventuais choques com pessoas e edifícios, com possibilidade de fatalidades.

Figura 8-4— Representação gráfica dos limites inferior e superior da plausibilidade (P) o inferior e a crença (B) o superior para a falha do tipo eventual de software p_{SC} .

8.3 Árvore de Falhas da Aeronave Tiriba

Neste Capítulo, foram apresentadas metodologias que permitem avaliar a confiabilidade de sistemas da aeronave com uso da árvore de falhas. Considerando as incertezas associadas à confiabilidade de sistemas não certificados, a Teoria da Evidência será usada neste item para obtenção de um valor quantitativo de probabilidade de falha para uma aeronave específica VANT Tiriba da empresa AGX. O valor quantitativo será usado como base para a avaliação da taxa de acidentes com pessoas e construções no item 8.4.

A Figura 8-6 e a Figura 8-7, apresentam a árvore de falhas da aeronave Tiriba e a Tabela 8-2 a quantificação da taxa de falhas devido à falha de seus sistemas internos ou falha de controle devido a causas desconhecidas.

Figura 8-5– VANT Tiriba.

Figura 8-6– Árvore de falhas de sistemas da aeronave Tiriba.

Figura 8-7– Árvore de falhas devido a causas desconhecidas da aeronave Tiriba.

Tabela 8-2. Determinação da probabilidade de falha da aeronave devido à falha de seus sistemas internos, λ .

		Sistema	Plausibilidade		Crença		Mass
1	FEnergiaBase	Absence of energy at base	400	2.50E-03	1000	1.00E-03	1
2	CCAdversa	Adverse climatic condition	10	1.00E-01	50	2.00E-02	1
3	FHSvAileron	Aileron servo fail	200	5.00E-03	1000	1.00E-03	1
4	FPitotAlt	Altitude and climb sensor failure	10000	1.00E-04	20000	5.00E-05	1
5	Fpitot	Barom unit fail	10000	1.00E-04	20000	5.00E-05	1
6	FHwNote	Base station hw failure	5000	2.00E-04	10000	1.00E-04	1
7	FBat	Battery failure	200	5.00E-03	500	2.00E-03	1
8	FBatVoo	Battery power outage	50	2.00E-02	100	1.00E-02	1
9	FHSvProfundor	Elevator servo failure	200	5.00E-03	1000	1.00E-03	1
10	FEnergia	Energy failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
11	FHwMotor	Engine failure	2000	5.00E-04	10000	1.00E-04	1
12	FEnergiaVoo	Flight power outage	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
13	FMGrave3	Fuselage breaks due to parachute opening	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1

14	FGPS	GPS failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
15	FIMU	Inercial system failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
16	FELVe	Minor Structural Failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
17	FMGrave2	Parachute cord breaks	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
18	FMGrave1	Parachute cover does not open	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
19	FHwProc	Processor hardware failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
20	FHwProp	Propeler failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
21	FRPM	Propeler Rotation sensor failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
22	BugSwGrave	Serious software failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
23	FEGrave	Severe structural failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
24	FHwESC	Speed controler failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
25	FPitoVel	Speed sensor failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
26	FHwTxR/CVant	Telecommand fail. @ acft	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
27	FHwTxR/CBase	Telecommand fail. @base	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
28	FHwTxRxBase	Telemetry fail. @base	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
29	FHwTxRxVant	Telemetry failure @ acft	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
30	FTSw	Temp Sw failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1
31	FWDTimer	Whatdog failure	300	3.33E-03	500	2.00E-03	1

8.4 Análise de Risco na Presença de Incerteza

A análise de risco de uma aeronave deve levar em conta parâmetros da aeronave e externos a ela para que se possa avaliar a probabilidade de uma falha catastrófica e as fatalidades dela decorrente. Essa é uma questão de suma importância para a definitiva inserção de VANTs no espaço aéreo controlado. A análise de risco pode levar em conta diversos elementos, como um conceito particular de operações (CONOPS), sistema e subsistemas das aeronaves, meio ambiente, presença de outras aeronaves da frota ou não, elementos mitigadores de colisão em voo, prioridades no cumprimento da missão e outros. A avaliação da segurança é obrigatória para inserção de VANT no espaço aéreo nacional, assim como para realizar avaliação de risco associado às missões (relé de comunicação, sensoramento remoto, monitoramento etc.). Afinal, as causas recorrentes que normalmente provocam um acidente aéreo são erros do operador, manutenção imprópria, perda de enlace de comunicações, falha de sistemas internos e meteorologia. Fatores agravantes são aqueles

relacionados ao sobrevoo de áreas densamente povoadas ou com consequências desastrosas em caso de choque descontrolado (depósito de combustíveis, por exemplo).

As referências (WEIBEL e HANSMAN, 2004), (GRIMSLEY, 2004) e (LUM e WAGGONER, 2011) fazem referência a diferentes modelos de impacto no solo, a fim de estabelecerem níveis de segurança para uma dada situação. No entanto, além de impacto com o solo, Lum e Waggoner (2011) também consideram colisões no ar por meio do choque hipotético entre um avião intruso e um VANT. Importante ressaltar que, em caso de uma colisão no ar, resíduos do VANT e da aeronave intrusa são esperados, caindo verticalmente no chão, impondo assim riscos adicionais à população. Este trabalho considera as duas hipóteses de acidentes (pouso de emergência e choque no ar). Assim, o modelo de Lum e Waggoner foi utilizado como base neste trabalho para avaliar consequências materiais e humanas em situações operacionais específicas. No entanto, este trabalho adiciona a incerteza no valor de confiabilidade dos VANTs, onde uma faixa de valores é considerada em vez de um valor único, e o modelo é adaptado para avaliar as alterações nas taxas de acidentes com a inserção de um sistema IFA²S a bordo de um VANT. Como os autores citados, o objetivo é fornecer ferramentas para fazer com que os níveis de risco de um VANT se tornem menores ou iguais àqueles aceitos pela aviação em geral.

Apresenta-se a seguir o modelo criado por Lum e Waggoner e as modificações necessárias para permitir uma avaliação do impacto do IFA²S na taxa de acidentes com pessoas e edifícios.

8.4.1. *PROBABILIDADE DE CHOQUE NO AR*

Para estimar a taxa de colisões no ar, será calculado o volume criado pelo cruzamento de uma aeronave (qualquer que seja) e um VANT. Para tanto, inicia-se através do estabelecimento do volume de colisão, ou seja, o volume do VANT e da outra aeronave (chamada intrusa) somados. Sendo ϕ_{vant} e ϕ_o as áreas frontais do Vant e da intrusa, respectivamente, tem-se que:

$$\phi_{col} = \pi(R_{vant} + R_o)^2 = \phi_{vant} + \phi_o + 2\sqrt{\phi_{vant}\phi_o}, \quad (8.10)$$

onde:

ϕ_{vant} - Área frontal do Vant;

ϕ_o - Área frontal da intrusa.

Para uma colisão ocorrer, o VANT e a aeronave intrusa irão cruzar suas rotas em um determinado tempo ΔT . Se ambas as aeronaves estiverem na mesma direção e em sentidos opostos, a velocidade relativa $V_{rel} = V_{vant} + V_o$ e o volume de colisão V_{col} dado por:

$$V_{col} = \phi_{col} V_{rel} \Delta T \quad (8.11)$$

A equação (8.11) mostra o volume formado pelo cruzamento frontal entre um VANT e uma aeronave intrusa. Para levar em conta a presença de inúmeras aeronaves intrusas e outros VANTS, considera-se como ρ_o a densidade total de aeronaves no volume da área de voo e N_{vants} o número de VANTS no volume, a taxa de colisões esperada se torna:

$$V_{col} = N_{vants} \rho_o \phi_{col} V_{rel} \quad (8.12)$$

A equação (8.12) desconsidera qualquer mecanismo que permita a percepção de rota de colisão e, conseqüentemente, medidas para evitá-la. Atualmente, partindo de dados de sensores ou dados de comunicação para identificar as aeronaves próximas, o IFA²S incorpora algoritmos especializados para evitar choques no ar com outros VANTS ou aeronaves tripuladas. Considerando como $\epsilon_{ifa,ar}$ a probabilidade do IFA²S conseguir evitar o choque com outra aeronave, tem-se que o fator $1 - \epsilon_{ifa,ar}$ fornece a probabilidade de um acidente.

Neste trabalho, define-se como $\epsilon_{ifa,ar}$ a probabilidade de um VANT evitar a colisão com uma aeronave intrusa. Ao contrário de Lum e Waggoner, não se considera o fator ϵ_o para uma aeronave evitar o choque com a não tripulada em estudo. Assim, para $N_{vants} = 1$, a razão esperada de colisão, F_c , é:

$$F_c = \rho_o \phi_{col} V_{rel} (1 - \epsilon_{ifa,ar}) \quad (8.13)$$

Conforme comentado, o IFA²S precisa utilizar meios para identificar a proximidade de outras aeronaves e adiciona algoritmos para evitar a colisão. Com o desenvolvimento destes algoritmos, além da maior confiabilidade para evitar o choque com a aeronave identificada, funções adicionais podem ser incorporadas para realizar a mudança de curso em meio a um cenário mais complexo. A próxima seção considera a taxa de acidentes devido ao pouso forçado e a capacidade de mitigar acidentes considerando fatores como a identificação

precoce de falhas em sistemas internos, pouso em áreas proibidas e povoadas, baixa altitude e tempestades.

8.4.2. *POUSO FORÇADO*

O modelo apresentado por Lum e Waggoner incorpora os desenvolvimentos de trabalhos anteriores para considerar duas situações distintas para colisão com o solo, (MCGEER, NEWCOME e VAGNERS, 1999), (MCGEER, 1994) e (CLOTHIER, WALKER, *et al.*, 2007). Na primeira, a aeronave realiza pouso de emergência com o maior ângulo possível devido à falha de sistema interno e, na segunda, ela cai verticalmente devido ao choque com outra no ar. A incorporação do IFA²S permite que haja elementos adicionais de segurança à ocorrência de falhas de sistema internos e outros não considerados por Lum e Waggoner, como a falta ou falha na tomada de decisão humana (perda de controle pelo rádio, por exemplo), meteorologia e a busca por locais específicos para pouso (baixa densidade populacional e de construções humanas). Todos estes elementos diminuem a probabilidade de danos a pessoas ou materiais. Outra modificação no modelo é a alteração da distância em solo percorrida pelo VANT após o pouso por emergência. No modelo original, considerou-se o comprimento da aeronave L_{vant} , no modificado considera-se a possibilidade de distâncias maiores para pouso após o toque da aeronave com o solo, D_g . O choque do VANT com uma pessoa ou construção ocorrerá quando a aeronave descendo em rampa com ângulo γ tiver em seu trajeto uma pessoa com altura H_p e raio R_p ou um edifício de altura H_b e dimensões horizontes idênticas e iguais a w_b , veja Figura 8-8. Com estas considerações, as áreas de perigo para humanos e edifícios para o pouso forçado de um VANT estão representadas respectivamente nas equações (8.14) e (8.15).

Figura 8-8– Representação do pouso forçado de um VANT em relação a uma construção humana ou pessoa.

$$A_{LHp} = (w_{vant} + 2R_p) \left(D_g + \frac{H_p}{\tan \gamma} + 2R_p \right) \quad (8.14)$$

$$A_{LHb} = (w_{vant} + w_b) \left(D_g + \frac{H_b}{\tan \gamma} + w_b \right) \quad (8.15)$$

onde:

A_{LHp} - Área letal para pedestres em pouso forçado;

A_{LHb} - Área letal para construções humanas em pouso forçado;

L_{vant} - Comprimento do VANT;

w_{vant} - Distância entre as duas pontas de asa do VANT (*wingspan*);

D_g - Distância percorrida de pouso após o toque da aeronave com o solo;

γ - Ângulo da rampa de descida da aeronave;

H_p - Altura da pessoa (=1,75m);

R_p - Raio da pessoa (=0,25m);

H_b - Altura do edifício;

w_b - Dimensões horizontais do edifício idênticas nos dois eixos.

As duas equações acima precisam ser alteradas no caso de colisão no ar, pois foram desenvolvidas para o caso em que a aeronave tenha condições de pouso. Caso haja choque com outro avião em voo, considera-se que haverá queda vertical do VANT até o solo.

$$A_{LVp} = \pi \left(\frac{\max(w_{vant}, L_{vant})}{2} + R_p \right)^2 \quad (8.16)$$

$$A_{LVb} = \pi \left(\frac{\max(w_{vant}, L_{vant})}{2} + \frac{w_b}{2} \right)^2 \quad (8.17)$$

onde:

A_{LVp} - Área letal para pedestres em queda vertical do VANT;

A_{LVb} - Área letal para construções humanas em queda vertical do VANT.

8.4.3. TAXA DE COLISÃO COM PESSOAS E CONSTRUÇÕES

Considerando as equações desenvolvidas nos dois itens anteriores, podem-se deduzir as taxas de colisão da aeronave com pessoas e prédios devido a um pouso forçado ou choque no ar com outra aeronave.

A taxa de colisões devido ao pouso forçado do VANT com pessoas $F_{pf,p}$ e prédios $F_{pf,b}$, sem uso de ferramentas de mitigação, pode ser encontrada pelas equações abaixo.

$$F_{pf,p} = N_{vants} \lambda \sigma_p A_{LHp} \quad (8.18)$$

$$F_{pf,b} = N_{vants} \lambda \sigma_b A_{LHb} \quad (8.19)$$

onde:

σ_b , σ_p - Respectivamente, densidade de construções e de pedestres na área (itens/m²).

λ - Taxa de falhas em voo para um único VANT (falhas / hora), derivada da análise da árvore de falhas.

$F_{pf,p}$ - Taxa de colisões devido ao pouso forçado do VANT com pessoas;

$F_{pf,b}$ - Taxa de colisões devido ao pouso forçado do VANT com prédios.

Considerando que o IFA²S introduzirá mecanismos de mitigação, a taxa de colisão com pessoas e edifícios deve diminuir. Define-se:

$\epsilon_{ifa,geo}$: a probabilidade de um VANT evitar uma área povoada ou proibida e choque com o terreno em condições de voo de cruzeiro;

$\epsilon_{ifa,si}$: a probabilidade de um VANT evitar um pouso forçado devido à falha catastrófica de um sistema interno;

$\epsilon_{ifa,met}$: a probabilidade de um VANT evitar um pouso forçado devido à meteorologia;

$\epsilon_{ifa,fc}$: a probabilidade de um VANT evitar um pouso forçado devido à falta de enlace de controle.

Neste caso, as equações (8.18) e (8.19) se tornam:

$$F_{pf,p} = N_{vants} \lambda \sigma_p A_{LHp} (1 - \epsilon_{ifa,geo}) (1 - \epsilon_{ifa,si}) (1 - \epsilon_{ifa,met}) (1 - \epsilon_{ifa,fc}) \quad (8.20)$$

$$F_{pf,b} = N_{vants} \lambda \sigma_b A_{LHb} (1 - \epsilon_{ifa,geo}) (1 - \epsilon_{ifa,si}) (1 - \epsilon_{ifa,met}) (1 - \epsilon_{ifa,fc}) \quad (8.21)$$

Por simplicidade, considera-se os fatores $\epsilon_{ifa,geo}$, $\epsilon_{ifa,si}$, $\epsilon_{ifa,met}$ e $\epsilon_{ifa,fc}$ idênticos e iguais a $\epsilon_{ifa,g}$. Assim:

$$F_{pf,p} = N_{vants} \lambda \sigma_p A_{LHp} (1 - \epsilon_{ifa,g})^4 \quad (8.22)$$

$$F_{pf,b} = N_{vants} \lambda \sigma_b A_{LHb} (1 - \epsilon_{ifa,g})^4 \quad (8.23)$$

Tendo em conta a avaliação de somente um VANT, $N_{vants} = 1$:

$$F_{pf,p} = \lambda \sigma_p A_{LHp} (1 - \epsilon_{ifa,g})^4 \quad (8.24)$$

$$F_{pf,b} = \lambda \sigma_b A_{LHb} (1 - \epsilon_{ifa,g})^4 \quad (8.25)$$

As equações abaixo apresentam as taxas de colisões com pessoas e prédios devido à uma colisão do VANT com outra aeronave no ar.

$$F_{ar,p} = F_c \sigma_p A_{LVp} \quad (8.26)$$

$$F_{ar,b} = F_c \sigma_b A_{LVb} \quad (8.27)$$

Com uso das equações (8.24) a (8.27), a taxa total de colisão com pessoas e prédios podem então ser descrita como ($N_{vants} = 1$):

$$F_p = F_{ar,p} + F_{pf,p} \quad (8.28)$$

$$F_b = F_{ar,b} + F_{pf,b} \quad (8.29)$$

8.5 Estimativas de Influência do IFA²S nas Taxas de Colisão

Para avaliar a taxa de acidentes com maior ou menor uso de um sistema IFA²S, foi criado um ambiente operacional hipotético. Este ambiente considera um VANT voando em uma determinada área com quantidade variável de aeronaves intrusas no ar e de pessoas e edifícios no solo. O impacto do IFA²S levou em conta as equações apresentadas no item anterior e permitiu verificar a sua efetividade para evitar fatalidades.

A Tabela 8-3, Tabela 8-4 e Tabela 8-5 apresentam o ambiente no qual o VANT se encontra. Diversas simulações em MATLAB seguem a estas Tabelas, considerando o

aumento de pessoas, edifícios e densidade de aeronaves. A maior ou menor efetividade do IFA²S se baseia na presença do fator ϵ_{ifa} nos diversos casos, conforme as equações descritas.

No entanto, é importante ressaltar que uma análise rápida pode levar o leitor a uma conclusão errônea em relação ao fator que evita colisões em voo. A observação da equação (8.13) em comparação com as (8.22) e (8.23) permite reconhecer que o fator IFA²S relacionado aos acidentes aéreos possui potência 1, enquanto àquele relacionado às questões envolvendo solo possui potência 4. Este fato incrementa a importância do fator relacionado ao solo em relação ao ar nas equações (8.28) e (8.29) e, por esta razão, foi incluída figura específica para tratar a taxa de acidentes aéreos de forma separada (razão esperada de colisão, F_c).

Tabela 8-3. Parâmetros das aeronaves na área de missão do VANT em análise utilizados para a avaliação de risco.

Parâmetro	Valor	Unidade	Comentário
$V_{acft} =$	150	km/h	Velocidade cruzeiro da aeronave intrusa
$\rho_0 =$	$2,19 \cdot 10^{-19}$	m ⁻³	Densidade de intrusos
$\phi_{acft} =$	5,00	m ²	Área frontal das aeronaves intrusas
$R_{acft} =$	1,26	m	Raio das aeronaves intrusas
$P_0 =$	2		Passageiros dentro das aeronaves intrusas

Tabela 8-4. Dados sobre o VANT em análise para avaliação de risco.

Dados da ARP Tiriba			
Parâmetro	Valor	Unidade	Comentário
$V_{ua} =$	100	km/h	Velocidade cruzeiro
$\omega_{ua} =$	2,24	m	Envergadura
$\gamma =$	60	graus	Ângulo de planeio em emergência
$\phi_{ua} =$	0,37	m ²	Área Frontal
$R_{ua} =$	$3,42 \cdot 10^{-01}$	m	Raio
$L_{ua} =$	1	m	Comprimento
$\lambda =$	$2,31 \cdot 10^{-04} - 1,08 \cdot 10^{-01}$		Faixa de incerteza da PdF do VANT (obtida da árvore de falhas)
$\phi_{col} =$	5,37	m ²	Área de colisão

Tabela 8-5. Características da área de operação do VANT.

Área de Operação			
Parâmetro	Valor	Unidade	Comentário
$VOL_{voo}=$	$4,57.10^{+09}$	m^3	Volume da área de voo (1000ft * 15km ²)
$N_{ua}=$	1		Número de ARP no ar
$N_{acft}=$	<i>Variável</i>		Número de intrusos no ar
$M_I=$	1344	Hours	Número de horas de operação por ano (por VANT)
$A_{opr}=$	$1,5.10^{+07}$	m^2	Área de Operação
$Ceiling=$	1000	ft	Altitude máxima
$\sigma_b=$	$1,0.10^{-06}$	bldg/m ²	Densidade de construções
$A_b=$	50	m^2	Área média das construções
$H_b=$	3	m	Altura média das construções
$D_b=$	0,42		Densidade de colisões fatais
$\sigma_p=$	$2,6.10^{-07}$	pedestre/m ²	Densidade de pedestres
$R_p=$	0,25	m	Raio dos pedestres
$H_p=$	1,75	m	Altura dos pedestres
$D_{ped}=$	1	fatalidade/colisão	Expectativa de fatalidades devido à colisão de uma ARP com um pedestre (assumido que todo choque resulta em fatalidade).

Figura 8-9– Influência do $\epsilon_{ifa,ar}$ na razão esperada de colisão, F_c , com $\lambda=5.10^{-3}$ e $\rho_0=2,19.10^{-19} m^{-3}$.

Figura 8-10– Influência do $\epsilon_{ifa,ar}$ taxas de colisões $F_{ar,p}$ com pessoas devido à uma colisão do VANT com outra aeronave no ar, com $\lambda=5.10^{-3}$ e $\rho_0=2,19.10^{-19} \text{ m}^{-3}$.

Figura 8-11– Influência do $\epsilon_{ifa,ar}$ na taxa de colisão $F_{ar,p}$ com pessoas devido à uma colisão do VANT com outra aeronave no ar, com $\lambda=5*10^{-3}$, $\epsilon_{ifa,g}=0$ e com ρ_0 em m^{-3} .

Figura 8-12– Impacto do $\epsilon_{ifa,g}$ na taxa de fatalidades com aumento da concentração de pessoas, com $\lambda=5*10^{-3}$ e $\rho_0=2,19.10^{-19} \text{ m}^{-3}$.

Figura 8-13– Impacto do $\epsilon_{ifa,g}$ na taxa de fatalidades com aumento da concentração de pessoas, e variação de λ .

8.6 Interpretação dos Resultados

O item 8.5 apresentou projeções em que a variação de índices relacionados à capacidade do IFA²S alterava a taxa de danos a pessoas e construções humanas devido a um acidente com um VANT. Considerando uma aeronave específica e uma área de operações como referência, foram variadas a densidade de aeronaves no ar e pessoas e construções no solo para verificar qual seria o impacto do IFA²S para evitar um choque no ar com outra aeronave ou devido a um pouso descontrolado. Este item tem o objetivo de avaliar os resultados obtidos.

Foi verificado como a eficiência de um sistema IFA²S influencia a taxa de acidentes no ar e na terra com a variação da densidade de pessoas e construções e também quanto à incertezas associadas à confiabilidade dos sistemas da aeronave. Os dois parâmetros relacionados ao IFA²S são o $\epsilon_{ifa,ar}$ e o $\epsilon_{ifa,g}$ e λ é o que traduz a confiabilidade dos sistemas da aeronave, considerado variável devido uso de componentes e partes não certificadas para uso aeronáutico.

A Figura 8-9 e a Figura 8-10 mostram, respectivamente, a influência do fator $\epsilon_{ifa,ar}$ na taxa de colisão no ar F_c e a na taxa de colisão com pessoas $F_{ar,p}$, devido à uma colisão do VANT com outra aeronave no ar, mantendo fixas as outras variáveis. Na Figura 8-9, o fator $\epsilon_{ifa,ar}$ tornou a probabilidade de uma colisão cerca de 100 vezes menor. Em caso de acidente aéreo, os debris resultantes caem na vertical e podem causar danos a pessoas. A Figura 8-10 mostra esta taxa variando a concentração humana e a efetividade do fator $\epsilon_{ifa,ar}$. Em ambos os casos a probabilidade é baixa, mas as consequências são graves.

A Figura 8-11 ilustra a variação na taxa de colisão com pessoas, tendo em conta a variação na densidade de aeronaves. Apesar de densidades altas serem pouco prováveis na maior parte dos locais, aeroportos e terminais pode concentrar um tráfego aéreo intenso. Neste caso, o $\epsilon_{ifa,ar}$ reduz a taxa em valor semelhante ao anterior, cerca de 100 vezes.

Considerando a potência 4 da equação (8.24), é esperada a maior influência do caso do fator $\epsilon_{ifa,g}$, como se vê na Figura 8-12 e Figura 8-13. A Figura 8-12 ilustra uma redução drástica da taxa de acidentes com pessoas, variando a sua densidade. Como apresentado, as diversas dimensões do IFA permitem uma abordagem mais holística dos riscos identificados

e precisam ser trabalhados em seus diversos eixos para que estes níveis de segurança sejam atingidos. Contudo, um sistema embarcado eficiente tornaria bastante improvável que houvesse uma fatalidade devido à queda de um VANT. A Figura 8-13 mostra que mesmo VANTs que utilizam componentes de aeromodelos recreativos seriam seguros do ponto de vista da possibilidade de uma fatalidade humana. Neste Figura, foi analisado o impacto do $\epsilon_{ifa,g}$ variando a confiabilidade do VANT (fator λ , se referindo a λ). Note que, mesmo aeronaves com possibilidade de um acidente a cada 10 horas ($\lambda=0,1$) possui taxas baixas de fatalidades se houver um valor alto para $\epsilon_{ifa,g}$.

8.7 Conclusões

Este Capítulo apresentou uma abordagem que permite a avaliação quantitativa de risco para pequenas aeronaves remotamente pilotadas, com valores incertos de confiabilidade em seus componentes, e uma metodologia de avaliação do impacto operacional da inclusão de um sistema IFA²S. Partindo da árvore de falhas de uma aeronave usou-se a teoria da evidência de Dempster-Shafer para avaliação da sua probabilidade de falha e a faixa de valores encontrada foi usada na avaliação de risco associada a uma operação.

A árvore de falhas forneceu a confiabilidade total do sistema (λ) e permitiu identificar os elementos que mais impactam seu valor total. O uso de uma faixa de confiabilidade λ na avaliação de risco resultou em uma faixa na avaliação de risco, com um valor otimista (menor) e outro pessimista (maior).

O aumento da efetividade de sistemas IFA²S provou diminuir de forma significativa a taxa de colisões com pessoas e edifícios no solo. Os algoritmos voltados a evitar o choque com outras aeronaves não se diferenciam de forma fundamental aos sistemas em desenvolvimento chamados *Sense and Avoidance*, para evitar o choque com outros aviões no ar. Contudo, a inclusão de parâmetros relacionados ao ambiente circundante ao VANT permitirá que a alteração de rota para evitar colisão em voo não adicione riscos, como a de entrada em zona restrita de voo (aeroportos e zonas povoadas, por exemplo) ou entrada em tempestades.

É evidente que o uso de múltiplas plataformas VANT em voo é desejável em aplicações civis e militares e a demanda atual deve aumentar. Uma solução técnica possível para diminuir o risco de colisões aéreas é tornar as aeronaves cientes da posição umas das outras e de procedimentos de desvio e posição relativa. Se cada uma das aeronaves estiver ciente das outras e das aeronaves tripuladas, mantendo distância segura ou relativa, assim como da posição das casas na área sobrevoada, pode-se esperar diminuição significativa do risco. O modelo de risco, todavia, demonstra que um aumento significativo de aeronaves exige valores de mitigação próximos de 1 para tornar o espaço aéreo novamente seguro, o que implica sistemas de comunicação entre aeronaves eficientes e confiáveis. Portanto, mesmo sem intervenção humana, é possível evitar, de forma simples e com baixo custo, situações de colisão no ar (utilizando algoritmos pré-armazenados) e no solo (no caso de uma aterragem de emergência), se somente forem usados algoritmos e sistemas de comunicação eficientes.

Além disso, caso uma aeronave perceba a presença de uma tempestade repentina ou de um incêndio florestal, ela pode compartilhar esse dado com sua frota e, se necessário, uma ou mais delas realizar uma mudança automática de rota durante o voo (informando a base no solo sobre a alteração), para aumentar a segurança de voo sem abortar a missão em andamento.

Os resultados do estudo realizado neste Capítulo podem servir para avaliação qualitativa e quantitativa do risco associado à operação de VANT e como auxílio à decisão para mudança dos subsistemas embarcados na aeronave não tripulada. A avaliação levou em conta as características e a arquitetura da aeronave, a área sobrevoada, a presença de outras aeronaves não previstas.

9 Arquitetura para Projeto do IFA²S em Hardware

Os capítulos anteriores permitiram um entendimento do posicionamento operacional e entendimento do IFA²S através de seus conceitos e simulações. Este Capítulo final tem o objetivo de orientar o leitor no que se refere à arquitetura para implementação do IFA²S em hardware e em embarque em uma aeronave não tripulada. O objetivo deste Capítulo não é criar um hardware específico nem tampouco apresentar resultados conclusivos, pois este dependerá da aeronave e da missão específica em vista, mas orientar sobre possíveis soluções de hardware, integração deste novo sistema na aeronave e também sobre possíveis sistemáticas para seu desenvolvimento. Tendo em consideração a necessidade e dificuldades advindas de custo, somou-se também uma sugestão de abordagem de desenvolvimento para enlace de dados visando servir como fonte de informações para o IFA²S.

O Capítulo apresenta inicialmente a arquitetura de integração da placa de IFA²S na aeronave. Em seguida, tem-se uma solução simples utilizando portas lógicas implementada para aeronaves de menor capacidade. Soluções mais completas exigem hardware com maior capacidade de processamento, assim uma máquina de estados é desenvolvida utilizando o aplicativo SCAD. Finalmente, apresenta-se uma abordagem de desenvolvimento de um rádio definido por software criado com software aberto.

9.1. Arquitetura de Integração

Para a integração do IFA²S na aeronave, é necessário considerar que ele é o agente responsável pelas decisões sobre a segurança de voo. Deve monitorar o desenvolvimento do voo e agir somente se houver risco percebido. Para aumento de confiabilidade do sistema, é necessário que esteja integrado ao piloto automático, mas em hardware separado e com a capacidade de agir sem a intervenção deste se necessário. Assim, para identificar uma situação de perigo e agir, realizando seu papel a bordo, ele deve coletar as informações da aeronave e do ambiente circundante e ser capaz de agir se necessário.

A Figura 9.1 mostra a arquitetura de integração do IFA²S de alto nível. As fontes primárias de dados para o IFA²S são provenientes do piloto automático, de enlaces rádio e dos sistemas embarcados. O piloto automático é o agente responsável pela navegação e, portanto, é quem primariamente controla as superfícies aerodinâmicas e o motor, contudo, o IFA²S monitora também a sua saúde para poder assumir as suas funções se necessário. Os enlaces rádio (“*data link*”) trazem dados da Base de Controle, de outra aeronave ou de outra fonte que podem ser relevantes, como de meteorologia e novas regiões interditadas em terra. A leitura constante dos sistemas julgados importantes para a segurança de voo permite o monitoramento da saúde da aeronave. Para a eventualidade de uma falha do piloto automático, o IFA²S recebe os dados de voo para poder assumir as suas funções, mesmo que de forma limitada. O comando de nova rota ao piloto automático (“*reroute*”) somente acontecerá se houver necessidade de desvio da rota prevista por razões de segurança, pois novas rotas visando o cumprimento da missão devem ser provenientes da Base ou de outros sistemas, como o MOSA por exemplo. A fonte padrão usada pelo *mutiplexador* (MUX) é a de comando manual do piloto humano em solo (“*Manual Command*”) ou do piloto automático, sendo o primeiro o responsável pela seleção, contudo, em caso de emergência, o IFA²S modifica a seleção prévia e assume o comando da aeronave. No entanto, sendo agente supervisor, o piloto humano pode tomar novamente o comando se julgar necessário.

Figura 9-1– Arquitetura de integração do IFA²S.

9.2. Solução utilizando portas lógicas

Como exemplo de solução simples e objetivando um aumento gradativo de maturidade de desenvolvimento, pode-se observar a placa IFA²S criada usando portas lógicas na Figura 9-2. O esquemático desta solução consta da Figura 9-3 e o circuito foi desenvolvido a partir de uma tabela da verdade com entradas referentes ao *heartbeat* do piloto automático, saúde do enlace rádio, escolha por comando manual ou autônomo da aeronave e, finalmente, um modo de centralização de comandos (superfícies aerodinâmicas), usando uma placa Arduino. Em caso de emergência (significa falha do piloto automático ou de comunicações com a Base), o sistema comanda o desligamento do motor e a abertura do paraquedas. Solução de baixo custo, fácil desenvolvimento e integração e que, ao mesmo tempo, pode salvar a aeronave em diversas situações.

Figura 9-2– Exemplo de implementação simples do IFA²S usando portas lógicas.

Figura 9-3– Esquemático do exemplo de implementação simples do IFA²S.

9.3. Máquina de Estados criada em ambiente SCADE

O embarque do IFA²S em um hardware específico pode ser realizado usando diversas abordagens de desenvolvimento de software e de hardware. O uso de arquitetura de modelos (“*Model-Driven Architecture*”, MDA) permite a criação de uma máquina de estados complexa a partir de um alto nível de abstração, (BOHNER, RAVICHANDAR e ARTHUR, 2007). Da mesma forma, a realização do projeto e seu embarque em hardware ficam facilitados com o uso de ambientes IDE (“*Integrated Development Environment*”) e com ferramentas CAD (“*Computer-Aided Design*”), trazendo métodos e ferramentas de engenharia de software associados. A escolha do hardware alvo determina de certa forma a linguagem e o ambiente de desenvolvimento. Nesta seção é apresentado um exemplo de desenvolvimento utilizando a ferramenta SCADE para geração de códigos em C e, apesar de não ter sido usada nesta tese, a ferramenta Active-HDL é apropriada para a geração de códigos em VHDL (ou Verilog) visando o embarque em dispositivos FPGA. O trabalho da referência (HAIGANG, JIA, *et al.*, 2014) fornece uma visão moderna sobre os diferentes aspectos técnicos dos FPGA.

As especificações do SCADE se baseiam em diagramas de blocos e modelos gráficos de máquinas de estado hierárquicas com especificações formais rigorosas para a geração de códigos em linguagem C. O compilador SCADE KCG é certificado no mais alto nível de certificação aviônica, que suprime a necessidade de testes de unidade do código gerado. A conformidade do código-fonte em C com os requisitos de baixo nível do SCADE é assegurada pela ferramenta de qualificação desenvolvimento KCG, segundo FAA 8110.49 (FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2003).

A Figura 9-4 mostra uma máquina de estados simplificada criada no ambiente SCADE para uma aeronave sem sistema de paraquedas e com propulsão elétrica. O estado “*Idle*” incorpora as funções de inicialização do estado Init e medidas que visam monitorar situações específicas do VANT. Como exemplo, pode-se considerar o caso de um VANT que utiliza motor elétrico, onde o alcance está relacionado à energia disponível nas baterias, assim a comparação constante entre a distância do local de pouso com o alcance é fator importante para a segurança de voo. A Figura 9-5 mostra um modelo presente no estado “*Idle*” e no estado “*Back Home*” para monitorar o alcance máximo (distância que pode ainda ser percorrida) considerando a tensão da bateria, as características do VANT e as condições de voo (velocidade aerodinâmica, por exemplo). A partir deste modelo, os códigos em C são gerados, Figura 9-6, e integrados no código do estado “*Idle*”. A Figura 9-7 mostra o modelo criado para determinar as condições de vento (direção e intensidade) a partir da comparação da proa e velocidade aerodinâmicas com o realizado em relação ao solo (determinado a partir das coordenadas GPS).

Figura 9-4— Máquina de estados gerada utilizando o SCADE.

Figura 9-5— Modelo criado no SCADE para geração de códigos em C para cálculo de alcance do VANT elétrico.

Figura 9-6– Estrutura do código em C gerado automaticamente pelo SCADE para cálculo atualizado de alcance durante o voo de um VANT elétrico.

Figura 9-7– Modelo criado no SCADE para geração de códigos em C para cálculo de direção e velocidade do vento.

9.4. Desenvolvimento de Rádio por Software para comunicação de dados

Os capítulos anteriores apresentaram a necessidade de comunicação de dados para vigilância sobre aeronaves na proximidade e estado do terreno sobrevoado. Esta seção apresenta uma abordagem para a criação de um rádio definido por software visando uma comunicação ponto-a-ponto utilizando software aberto GNU Radio. Por não ser objetivo desta tese, não foram incluídos protocolos aeronáuticos específicos, como o ADS-B, e nem tampouco elementos necessários à troca de mensagens, como capacidade de compensação de efeito *doppler*.

Os avanços tecnológicos no processamento de sinal digital abriram o caminho para uma nova abordagem de implementação de plataformas de comunicação sem fio, onde a maior parte do processamento de sinal é realizada em software e não em nível de hardware. Esta abordagem por software com componentes reconfiguráveis, criaram o termo SDR (“*Software Defined Radio*”). O SDR fornece um elevado grau de flexibilidade, incluindo a capacidade para implementar diferentes algoritmos de processamento digital de sinal.

O GNU Radio representa um conjunto de ferramentas de desenvolvimento de software livre para implementar rádios por software usando processadores e hardware disponíveis no mercado. Eles são amplamente utilizados não somente em ambientes acadêmicos para apoiar pesquisas de comunicações sem fio, mas também para a implementação de sistemas de rádio reais. As aplicações de GNU Radio são escritas principalmente usando a linguagem Python em nível mais alto e o processamento de sinal com desempenho mais crítico é implementado em C++.

O GNU Radio usa gráficos de fluxo para tratar o fluxo de dados. Nestes gráficos de fluxo, os nós são chamados de blocos, seus produtos são chamados de item e os pontos de entrada e de saída de dados de bordas.

Um receptor de rádio é composto de várias partes: uma antena que recebe o sinal de RF, um subsistema / frequência intermédia de RF (RF / IF), que converte e filtra o sinal na faixa espectral desejada e um demodulador que converte o sinal em um formato utilizável. O dado obtido é transmitido para uma aplicação e, finalmente, para o usuário. O transmissor

executa o processo inverso. Os blocos implementados em software usando o gráfico de fluxos estão após o conversor AD no receptor e antes do DA no transmissor, conforme Figura 9-8.

Figura 9-8– Os blocos implementados em software usando gráfico de fluxo se referem ao domínio digital.

O GNU Radio incorpora bibliotecas de blocos de processamento de sinal, SPM (“*Signal Processing Module*”), relacionadas com a realização às tarefas variadas, tais como: modulações (GMSK, B/QPSK, QAM), espalhamento espectral, códigos de correção de erro (Reed-Solomon, Viterbi), funções de processamento de sinal (filtros, FFTs, equalizadores), recuperação de *clock*, operações de entrada-saída e interfaces de comunicação com o hardware (cartões de RF).

Os experimentos utilizaram a placa USRP da empresa Ettus, portando um FPGA Spartan 6, Figura 9-9, com controle e alimentação feitas através de um laptop, Figura 9-10. O gráfico de fluxo, Figura 9-11, visou a transmissão e a recepção de dados utilizando modulação BPSK, conforme Figura 9-12. O gráfico de fluxo serviu de base para a geração automática dos códigos em VHDL e síntese no FPGA da placa. Pelo fato de haver somente uma placa USRP disponível, fez-se uso de duas antenas, uma para transmissão e outra para recepção, respectivamente os LEDs acesos em cores verde e vermelho na Figura 9-9. A Figura 9-12 mostra o resultado do experimento no tempo e em frequência, sendo que este último foi obtido através de uma transformada rápida de Fourier (“*Fast Fourier Transform*”, FFT) do sinal no tempo.

Figura 9-9– Placa USRP da empresa Ettus, portando um FPGA Spartan6.

Figura 9-10– A alimentação da placa USRP e o controle da empresa Ettus foi feito através de um laptop.

Figura 9-11– Diagrama de fluxo para transmissão e recepção de dados usando modulação BPSK.

Figura 9-12– Resultados obtidos na recepção dos sinais no tempo e em frequência, esquerda e direita respectivamente.

9.5. Conclusões

Este Capítulo apresentou resultados voltados ao embarque do IFA²S em hardware. Foi comentado que o objetivo não era apresentar resultados de testes em voo, mas sugestões para o desenvolvimento de soluções embarcadas. Neste sentido, mostrou-se uma arquitetura para a integração com o piloto automático e demais sistemas relacionados e algumas soluções de desenvolvimento de hardware.

O Capítulo apresentou a arquitetura de integração da placa de IFA²S na aeronave, desenvolvimento automático de códigos e um rádio para troca de dados. Mostrou-se que as placas do piloto automático e do IFA²S deveriam estar separadas e que este último deve receber dados diversos e ser capaz de comandar parcialmente a aeronave, se for necessário. Em seguida, verificou-se uma solução simples utilizando portas lógicas implementada para aeronaves de menor capacidade. Uma máquina de estados foi desenvolvida utilizando o aplicativo SCADE para geração de códigos em C certificáveis e embarque em microprocessadores. Finalmente, apresentou-se uma abordagem de desenvolvimento de um rádio definido por software criado com software aberto para uma solução de transmissão e recepção de dados utilizando um FPGA Spartan 6.

10 Conclusões Finais

Os altos índices de acidentes e a expansão do interesse e procura por Veículos Aéreos Não Tripulados provoca a criação de restrições na sua operação devido aos questionamentos sobre os riscos envolvidos. Esta tese visou minimizar este problema através da criação de um modelo de sistema capaz de aumentar a segurança aérea deste tipo de aeronave.

Aplicações civis e militares demandam cada vez mais o uso de VANTs, mas sua falta de confiabilidade e os riscos de operação resultantes têm provocado uma lenta regulamentação pelas autoridades aeronáuticas. A metodologia de projeto e a falta do piloto fazem com que as aeronaves sem piloto tenham os índices observados nos primeiros anos da aeronáutica mundial. É necessário adicionar um sistema capaz de incrementar a velocidade na identificação de eventos que possam resultar em acidentes e tomar as decisões de forma rápida, eficaz e eficiente. Isto, obviamente, envolve um sistema com informações adicionais e com maior capacidade de tomada de decisões em relação aos VANTs atuais. Com estas questões em foco, esta tese forneceu um modelo que visa aumentar a segurança de voo de Veículos Aéreos Não Tripulados.

Este trabalho apresentou um conceito inovador, chamado de *In-Flight Awareness* (IFA), que estabelece um modelo para a obtenção de consciência situacional em aeronaves não tripuladas, dando-lhe maior autonomia. A partir de eventos ocorridos interna ou externamente à aeronave, o sistema proposto verifica os sintomas (através dos dados dos sensores embarcados, ambientais e de tráfego aéreo) e toma decisões levando em consideração as capacidades da aeronave. As origens dos eventos são identificadas para evitar ou mitigar acidentes, mediante um algoritmo de análise e decisão. O objetivo da abordagem é maximizar a segurança da plataforma aérea através da detecção de falhas, do diagnóstico, da capacidade de auto-recuperação e do replanejamento de rotas, considerando obstáculos, riscos e recompensas envolvidos no processo decisório.

O Capítulo 2 apresentou os conceitos fundamentais e essenciais ao desenvolvimento do trabalho. Foram apresentados os conceitos básicos e arquiteturas típicas de Sistemas de Veículos Aéreos não Tripulados. Após estas informações iniciais, foram verificadas algumas

questões relacionadas à sua integração no espaço aéreo, o risco operacional envolvido na operação de VANTs, aspectos relacionados a acidentes aéreos da avião tripulada e não tripulada e a aceitação e avaliação quantitativa dos riscos operacionais. Para finalizar, foram apresentados os conceitos fundamentais sobre consciência situacional, de forma geral e não específica dos VANTs.

O Capítulo 3 fez uma revisão sistemática da literatura para verificar as publicações na área. Esta revisão permitiu um entendimento dos estudos em andamento e as tendências atuais, facilitando sobremaneira o posicionamento dos estudos desenvolvidos na tese.

O Capítulo 4 determinou os requisitos de alto nível necessários ao aumento de segurança de voo de VANTs por meio da metodologia *System Theoretic Process Analysis* (STPA). Seguindo esta metodologia, este capítulo identificou os acidentes e perigos na operação de um VANT, definiu malhas de controle para identificar os cenários em que acidentes podem ocorrer devido ao processo de decisão do piloto em solo ou de forma autônoma pela aeronave e, finalmente, os requisitos de alto nível necessários para aumentar a segurança de voo de VANTs.

O Capítulo 5 apresentou os conceitos preliminares sobre IFA e IFA²S, tendo em conta os requisitos estabelecidos e o objetivo de aumento da consciência situacional. Tendo sido apresentadas as dimensões do IFA e uma proposta de processo de definição do sistema embarcado IFA²S.

O Capítulo 6 apresentou um ambiente de simulação em que soluções automatizadas foram testadas em diferentes situações operacionais usando o aplicativo Labview e o simulador XPlane. A máquina de estados desenvolvida foi apresentada, assim como as estratégias usadas nos diversos estados.

O Capítulo 7 apresentou os resultados da simulação em Labview com uso do ambiente de simulação criado e das soluções implementadas na máquina de estados. Verificou-se diferentes soluções e que as soluções criadas diminuíram a taxa de acidentes quando as situações de risco se apresentaram.

O Capítulo 8 verificou o impacto do IFA²S no risco operacional de VANTs. Os resultados mostraram que o uso do sistema IFA²S embarcado diminui a taxa de acidentes com pessoas e com construções humanas na medida em que este se torna mais eficiente e maduro. Os estudos consideraram a taxa de falhas para o caso de uma aeronave sem valores determinados de confiabilidade de componentes.

O Capítulo 9 forneceu elementos de orientação para implementação do IFA²S em hardware. Mostrou-se inicialmente a arquitetura de integração com o piloto automático e as entradas e saídas necessárias às suas funções. Em seguida, viu-se uma solução simples implementada com portas lógicas e abordagens mais elaboradas de geração automática de códigos utilizando modelos. Finalmente, mostrou-se que existem ferramentas disponíveis de software aberto que permitem a construção de transceptores para servir ao enlace de dados, necessários à manutenção da consciência situacional.

Sugestão de trabalhos futuros:

1. A metodologia STPA foi usada somente para determinação de requisitos de segurança e seu uso pode ser ampliado. No segundo passo da metodologia, malhas de controle serão geradas e estas permitem uma melhor definição de um sistema IFA²S embarcado. Após o segundo passo, pode-se desenvolver um sistema IFA²S em hardware para ser testado em voo.
2. O uso de algoritmos genéticos traz uma capacidade diferenciada aos VANTs nacionais e deve ser melhor explorada. Apesar dos bons resultados obtidos com o algoritmo genético, é necessário adicionar mapas dinâmicos e que reflitam o ambiente ao redor da aeronave. Capacidade de considerar o tráfego aéreo circundante é também interessante.
3. Criação de novas soluções na máquina de estados. De forma geral, todas podem ser melhoradas e testadas em voo.
4. Desenvolvimento de um sistema de controle de voo de emergência para permitir o pouso em emergência da aeronave pelo IFA²S em caso de falha do sistema de piloto automático.

5. Dada a importância de se evitar colisões em voo, pode-se incorporar uma capacidade de comunicação de dados automática para alimentar o algoritmo de desvio automático. Sugere-se o uso de um rádio definido por software customizado para pequenas aeronaves (baixo volume aliado a baixo consumo energético e computacional) com protocolo ADS-B.

Referências

- ABBOTT, T. **Functional categories for future flight deck designs (NASA Technical Memorandum TM-109005)**. [S.l.]. 1993.
- AGARWAL, H. et al. Uncertainty quantification using evidence theory design optimization. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 85, n. 1-3, p. 281–294, 2004.
- AIRCRAFT-ENCYCLOPEDIA. Curtiss N-9, 2013. Disponível em:
<http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_curtiss_n9_en.php>. Acesso em: 29 nov. 2013.
- ANAC. **RBAC nº 21 - CERTIFICAÇÃO DE PRODUTO AERONÁUTICO**. Agência Nacional de Aviação Civil. [S.l.]. 2010.
- ANAC. **RBAC nº 61**. [S.l.]. 2010.
- ANAC. **RBAC nº 21 - Certificação de Produto Aeronáutico**. [S.l.]. 2011.
- ANAC. **Instrução Suplementar 21-002**. [S.l.]. 2012.
- ANAC. **RELATÓRIO DE ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES, Anexo à NT 61/2012/GTPN/SAR**. [S.l.]. 2012.
- ANAC. Regulamentos Brasileiros. Disponível em:
<<http://www2.anac.gov.br/biblioteca/rbha.asp>>. Acesso em: 07 jun. 2013.
- ARANTES, J. D. S. **Planejamento de Rota para VANTs em Caso de Situação Crítica: Uma Abordagem Baseada em Segurança**. São Carlos. 2015.
- ASTROV, I.; PEDAI, A. Flight Control of a Trirotor Mini-UAV for Enhanced Situational Awareness, 69, 2010. 271-277.
- ASTROV, I.; PEDAI, A. **Situational Awareness based Flight Control of a Drone**. Systems Conference (SysCon), IEEE International. Montreal, QC: [s.n.]. 2011. p. 574 – 578.
- AVIATION TROUBLESHOOTING. Total Number of Flight Time States Better Pilot's Proficiency?, 13 out. 2010. Disponível em:
<<http://aviationtroubleshooting.blogspot.com/2010/10/total-number-of-flight-time-states.html>>. Acesso em: 03 dez. 2013.
- BABER, C.; GRANDT, M.; HOUGHTON, R. J. Human factors models of mini Unmanned Aerial Systems in Network-Enabled capability. **Contemporary Ergonomics**, p. 282-290, 2009.

BAKER, D. H. **quoted in the “News and Comments” section of Army, Navy, Air Force Register.** [S.l.]. 1956.

BEA. **Rapport d'étape n° 3.** [S.l.]. 2011.

BEHNKE, D.; DANIEL, K.; WIETFELD, C. **Comparison of Distributed Ad-hoc Network Planning Algorithms for Autonomous Flying Robots.** IEEE Globecom. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

BEHNKE, D.; DANIEL, K.; WIETFELD, C. **Comparison of Distributed Ad-hoc Network Planning Algorithms for Autonomous Flying Robots.** IEEE Globecom. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

BLACKMORE, L.; ONO, M.; WILLIAMS, B. C. Chance-Constrained Optimal Path Planning With Obstacles. **IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS**, 27, n. 6, 2011.

BOCANIALA, C. D.; SASTRY, V. V. S. S. **On Enhanced Situational Awareness Models for Unmanned Aerial Systems.** IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: [s.n.]. 2010.

BOHNER, S.; RAVICHANDAR, R.; ARTHUR, J. Model-based engineering for change-tolerant systems. **Innovations Syst Softw Eng**, v. 3, p. 237–257, 2007.

BÖK, P.-B.; TÜCHELMANN, Y. **Context-Aware QoS Control for Wireless Mesh Networks of UAVs.** 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Maui, HI: [s.n.]. 2011.

BOSTIAN, C. W.; YOUNG, A. R. **Low-cost Cognitive Electronics Technology for Enhanced Communications and Situational Awareness for Networks of Small Unmanned Aerial Vehicles (UAV).** Blacksburg. 2013.

BRASIL. **DCA 1-1 "Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira".** [S.l.]. 2012.

BRASIL. **FCA 58-1 PANORAMA ESTATÍSTICO DA AVIAÇÃO CIVIL BRASILEIRA EM 2012.** Brasília. 2013.

BRASIL. **Protocolos de investigação de ocorrências aeronáuticas da aviação civil conduzidas pelo estado brasileiro.** [S.l.]. 2013.

BROOKE, P.; PAIGE, R. Fault trees for security system design and analysis. **Computers & Security**, Great Britain, v. 22, n. 3, p. 256-264, 2003.

BURMAN, J. et al. **Bio-inspired UAV routing, source localization, and acoustic signature classification for persistent surveillance.** Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR II. Orlando, USA: SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2011.

BURMAN, J. et al. **Autonomous UAV persistent surveillance using bio-inspired strategies**. Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR III. Orlando, USA: Proc. SPIE. 8389. 2012.

BUSH, L. A. M.; WANG, A. J.; WILLIAMS, B. C. **Risk-Based Sensing in Support of Adjustable Autonomy**. IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: [s.n.]. 2012.

BUSH, L. A. M.; WANG, A. J.; WILLIAMS, B. C. **Risk-Based Sensing in Support of Adjustable Autonomy**. IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: [s.n.]. 2012.

BYERS, K. **Situational Awareness for Surveillance and Interdiction Operations (SASIO): Tactical Installation Protection**. Monterey, CA. 2010.

BYERS, K. **Situational Awareness for Surveillance and Interdiction Operations (SASIO): Tactical Installation Protection**. Monterey, CA. 2010.

BYERS, K. L.; CHUNG, T. H.; JOHNSON, R. T. **Modeling and Analysis of Tactical Installation Protection Missions**. Winter Simulation Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2010.

CAI, G. et al. **A Brief Overview on Miniature Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles**. 8th IEEE International Conference on Control and Automation. Xiamen, China: [s.n.]. 2010.

CALHOUN, G. L. et al. **Synthetic vision system for improving unmanned aerial vehicle operator situation awareness**. Enhanced and Synthetic Vision. [S.l.]: [s.n.]. 2005.

CALHOUN, G. L. et al. **Simulation assessment of synthetic vision concepts for UAV operations**. Enhanced and Synthetic Vision 2006. Orlando, FL : [s.n.]. 2006.

CALHOUN, G. L.; DRAPER, M. H.; RUFF, H. A. **Effect of level of automation on unmanned aerial vehicle routing task**. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 197-201.

CARNIE, R.; WALKER, R.; CORKE, P. **Ryan Carnie; Rodney Walker; Peter Corke. Image Processing Algorithms for UAV "Sense and Avoid"**. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, Florida: [s.n.]. 2006.

CECOMSAER. Formação do Piloto de A a Z – Aviação de Caça. **Blog oficial da Força Aérea Brasileira**, 2013. Disponível em:
<<http://www.forcaaereablog.aer.mil.br/index.php?p=1435>>. Acesso em: 03 dez. 2013.

CENIPA. **FCA 58-1 – “Panorama Estatístico da Aviação Civil Brasileira”**. Brasília, DF, Brasil. 2013.

CHEN, J. Y. C.; BARNES, M. J.; HARPER-SCIARINI, M. Supervisory Control of Multiple Robots: Human-performance Issues and User-Interface Design. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C**, v. 41, n. 4, p. 435-54, 2011.

CHOI, H.; KIM, Y.; HWANG, I. **Vision-based Reactive Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle**. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Portland, Oregon: [s.n.]. 2011.

CLOTHIER, R. et al. **A Casualty Risk Analysis For Unmanned Aerial System (UAS) Operations Over Inhabited Areas**. Twelfth Australian International Aerospace Congress. [S.l.]: [s.n.]. 2007.

CONNOR, J. et al. **Scalable Spectrum Situational Awareness Using Devices of Opportunity**. Military Communications Conference - MILCOM. [S.l.]: [s.n.]. 2012.

COOK, M. B. et al. **Design and validation of a synthetic task environment to study dynamic unmanned aerial vehicle re-planning**. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 192-196.

COOK, M. B.; SMALLMAN, H. S. **When Plans Change: Task Analysis and Taxonomy of 3-D Situation Awareness Challenges of UAV Replanning**. San Diego, CA. 2010.

CORNIC, P. et al. **Sense and Avoid Radar using Data Fusion with Other Sensors**. Aerospace Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2011.

DANIEL, K. et al. Cognitive Agent Mobility for Aerial Sensor Networks. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 11, p. 2671-2682, 2011.

DEKKER, S. **The Field Guide to Human Error Investigations**. [S.l.]: Ashgate, 2002.

DEMPSTER, A. P. A generalization of Bayesian inference. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 30, n. Series B, p. 205-247, 1968.

DRURY, J. L.; RIEK, L.; RACKLIFFE, N. **A Decomposition of UAV-Related Situation Awareness**. Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction. Salt Lake City, Utah: [s.n.]. 2006.

DULAC, N.; LEVESON, N. Incorporating Safety Risk in Early System Architecture Trade Studies. **JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS**, 46, n. 2, 2009.

DUNKEL, R.; LINK, Z.; VERGE, T. **Enhancing situational awareness of U.S. navy networks with persistent ISR Using predator B/MQ-9 reaper surrogate platform**. AUVSI Unmanned Systems North America Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 1072-1078.

DURRANT-WHYTE, H.; STEVENS, M. **Data Fusion in Decentralised Sensing Networks**. Conference on Information Fusion. [S.l.]: [s.n.]. 2001.

ENDSLEY, M. R. **Design and evaluation for situation awareness enhancement**. Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting. Santa Monica, CA: [s.n.]. 1988.

ENDSLEY, M. R. **Design and evaluation for situation awareness enhancement**. Proceedings of the Human Factors Society 32nd Annual Meeting. Santa Monica, CA: [s.n.]. 1988.

ENDSLEY, M. R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. **Human Factors**, v. 37, p. 32-64, March 1995.

ENDSLEY, M. R. Automation and Situation Awareness. In: PARASURAMAN, R.; MOULOUA, M. **Automation and human performance: Theory and Applications**. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, 1996. p. 163-181.

ENDSLEY, M. R. **Designing for situation awareness in complex systems**. Proceedings of the Second international workshop on symbiosis of humans, artifacts and environment. Kyoto, Japan: [s.n.]. 2001.

ENDSLEY, M.; BOLTE, B.; JONES, D. **Designing for Situation Awareness: An Approach to User-Centered Design**. Boca Raton: Taylor Francis Group, 2003.

ERICSON, C. A. **Fault tree analysis - a history**. Proceedings of The 17th International System Safety Conference. [S.l.]: [s.n.]. 1999.

FAA. Emergency Procedures. In: ____ **Airplane Flying Handbook FAA-H-8083-3A**. [S.l.]: [s.n.], 2004.

FAA. **FAA Modernization and Reform Act of 2012**. [S.l.]. 2012.

FAA. **Aeronautical Information Manual**. [S.l.]. 2013.

FAA. **General Aviation Fatal Accident Rate**. [S.l.]. 2013.

FAA. **Integration of Civil Unmanned Aircraft Systems (UAS) in the National Airspace System (NAS) Roadmap**. [S.l.]. 2013.

FAA. **FAR 21.183 - Standard Airworthiness Certificates**. Federal Aviation Administration. [S.l.]. 2014.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **25.1309-1A - System Design and Analysis**. [S.l.]. 1988.

- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. 8110.49 - Software Approval Guidelines, 2003.
Disponível em:
<https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/13692>. Acesso em: Aug 2015.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Chapter 4: Automated Flight Control. In: ____
Advanced Avionics Handbook. Washington: United States Government Printing Office, 2009.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Risk Management Handbook**. [S.l.]. 2009.
- FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Title 14: Aeronautics and Space**. Washington, DC. 2015.
- FERN, L. et al. **UAS integration into the NAS: An examination of baseline compliance in the current airspace system**. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 41-45.
- FERN, L.; SHIVELY, R. J. **A comparison of varying levels of automation on the supervisory control of multiple UASs**. AUVSI Unmanned Systems North America Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 315-325.
- FIGUEIRA, N. et al. **Mission Oriented Sensor Arrays – An Approach towards UAS Usability Improvement in Practical Applications**. 5TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS). Munich: [s.n.]. 2013.
- FIGUEIRA, N. et al. **Mission Oriented Sensor Arrays – An Approach towards UAS Usability Improvement in Practical Applications**. 5TH European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Munich: [s.n.]. 2013.
- FLIGHT SAFETY FOUNDATION. fatal airliner (14+ passengers) hull-loss accidents. **Aviation Safety Network**, 2013. Disponível em: <<http://aviation-safety.net/statistics/period/stats.php?cat=A1>>. Acesso em: 04 dez. 2013.
- FONSECA, E.; MATTEI, A. P.; CUNHA, W. C. **Adaptive integration systems using FPGA COTS devices**. 5TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS). Munich: [s.n.]. 2013.
- FORTMANN, F.; LUDTKE, A. **An intelligent SA-adaptive interface to aid supervisory control of a UAV swarm**. 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Bochum, Germany: IEEE. 2013. p. 768-73.
- FOY, W. H. Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, AES-12, n. 2, 1976.

FUCHS, C. et al. **Adaptive Consoles for Supervisory Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles**. 15th International Conference Human-Computer Interaction. Las Vegas, NV: Springer Verlag. 2013.

FUCHS, C. et al. **Adaptive Consoles for Supervisory Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles**. 15th International Conference Human-Computer Interaction. Las Vegas, NV: Springer Verlag. 2013.

FULTON, N. L. et al. **An Automated General Aviation Protection System for Manned and Unmanned Aircraft**. IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Seattle, WA: [s.n.]. 2011.

GARTENBERG, D.; MCCURRY, M.; TRAFTON, G. **Situation awareness reacquisition in a supervisory control task**. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 355-359.

GENERAL ATOMICS. Predator® UAS, 2013. Disponivel em: <<http://www.ga-asi.com/products/aircraft/predator.php>>. Acesso em: 30 nov. 2013.

GODDEMEIER, N. et al. **Evaluation of Potential Fields Mobility Strategies for Aerial Network Provisioning**. IEEE GLOBECOM Workshops. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1291-1296.

GODDEMEIER, N.; DANIEL, K.; WIETFELD, C. Role-Based Connectivity Management with Realistic Air-to-Ground Channels for Cooperative UAVs. **IEEE Journal On Selected Areas In Communications**, v. 30, n. 5, p. 951-963, 2012.

GOMEZ-ACEVEDO, H. **Trans Dimensional System for Situational Awareness and I.S.R.** Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE/AIA. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 2E2-1 - 2E2-9.

GOOSSENS, A. A. H. E.; KOENERS, G. J. U.; THEUNISSEN, E. **Development and Evaluation of Level 3 Situation Awareness Support Functions for a UAV Operator Station**. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2004.

GRIFFITH, J.; LEE, S. **Environment Modeling for Sense and Avoid Sensor Safety Assessment**. 30th Digital Avionics Systems Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 16 - 20.

GRIMSLEY, F. M. **Equivalent Safety using Casualty Expection Approach**. AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2004.

HAIGANG, Y. et al. REVIEW OF ADVANCED FPGA ARCHITECTURES AND TECHNOLOGIES. **JOURNAL OF ELECTRONICS**, v. 31, n. 5, Oct 2014.

HANNES SEPPÄNEN, J. M. P. L. K. V. Developing shared situational awareness for emergency management. **Safety Science**, v. 55, p. 1-9, 2013.

- HEINRICH, H. W. **Industrial accident prevention**. [S.l.]: McGraw-Hill., 1931.
- HIGGINS, R. P. **AUTOMATIC EVENT RECOGNITION FOR ENHANCED SITUATIONAL AWARENESS IN UAV VIDEO**. Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE. Atlantic City, NJ: [s.n.]. 2005. p. 1706 - 1711.
- HOW, J. P. et al. Increasing autonomy of UAVs: Decentralized CSAT mission management algorithm. **IEEE Robotics and Automation Magazine**, 16, n. 2, 2009. 43-51.
- HU, Q. et al. **Intelligent UAS situation awareness and information delivery**. AUVSI Unmanned Systems North America Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1191-1196.
- IFI. Certificação Militar. Disponível em: <www.ifi.cta.br>. Acesso em: 07 jun. 2013.
- ISCOLD, P.; PEREIRA, G. A. S.; TORRES, L. A. B. Development of a Hand-Launched Small UAV for Ground Reconnaissance. **Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on**, v. 46, n. 1, p. 335 - 348, 2010.
- ISHIMATSU, T. et al. **Modeling and hazard analysis using STPA**. [S.l.]: 4th IAASS Conference - Making Safety Matter. 2010.
- JACOB, C.; DUBOIS, D.; CARDOSO, J. **Evaluating the Uncertainty of a Boolean Formula with Belief Functions**. IPMU 2012, Part III, CCIS 299. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 521-531.
- JONES, C. A. **Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) an Assessment of Historical Operations and Future Possibilities**. [S.l.]. 1997.
- KATZ, KENNETH P., AND KATZ AEROSYSTEMS. **Before Predator: The early history of USAF remotely piloted aircraft**. [S.l.]. 2013.
- KUON, I.; ROSE, J. Measuring the Gap Between FPGAs and ASICs. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**, v. 26, n. 2, p. 203-215, Feb 2007.
- KUVICH, G. **Situation Awareness for UAV equipped with Image/Video Understanding System based on network-symbolic models**. Unattended/Unmanned Ground, Ocean, and Air Sensor Technologies and Applications VI. Orlando, FL: [s.n.]. 2004.
- LEE, J.-W.; WALKER, B.; COHEN, K. **Path planning of unmanned aerial vehicles in a dynamic environment**. AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit. [S.l.]: [s.n.]. 2011.
- LEONARD, J.; SAVVARIS, A.; TSOURDOS, A. **Towards a fully autonomous swarm of unmanned aerial vehicles**. UKACC International Conference on Control. Cardiff, UK: IEEE, Piscataway, NJ, USA. 2012.

LEONARD, J.; SAVVARIS, A.; TSOURDOS, A. **Towards a Fully Autonomous Swarm of Unmanned Aerial Vehicles**. UKACC International Conference on Control. Cardiff, UK: [s.n.]. 2012.

LEVESON, N. **Engineering a Safer World: Applying Systems Thinking to Safety**. Cambridge: MIT Press, 2012.

LEVESON, N. A systems approach to risk management through leading safety indicators, v. 136, p. 17–34, 2015.

LEVESON, N. et al. **A Comparison of STPA and the ARP 4761 Safety Process Assessment**. Cambridge, MA. 2014.

LI, Y. et al. **The new environment model building method of penetration mission based on the artificial potential field approach**. IEEE International Multi-Disciplinary Conference on. New Orleans, LA: [s.n.]. 2012.

LIE, F. A. P.; GO, T. H. A collision-free formation reconfiguration control approach for unmanned aerial vehicles. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, v. 8, n. 5, p. 1100-7, 2010.

LIN, C. E.; LI, C.-R.; LAI, Y.-H. **UAS Cloud Surveillance System**. 41st International Conference on Parallel Processing Workshops. Pittsburgh, PA: [s.n.]. 2012.

LUM, C.; WAGGONER, B. **A Risk Based Paradigm and Model for Unmanned Aerial Systems in the National Airspace**. Infotech@Aerospace. St Louis, Missouri: [s.n.]. 2011.

LUO, C. et al. UAV Position Estimation and Collision Avoidance using the Extended Kalman Filter. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v. PP, n. 99, 2013.

MACHUCA, J. P. **Streamlining the Change-Over Protocol for the RPA Mission Intelligence Coordinator by way of Situation Awareness Oriented Design and Discrete Event Simulation**. [S.l.]. 2012.

MACHUCA, J. P. **Streamlining the Change-Over Protocol for the RPA Mission Intelligence Coordinator by way of Situation Awareness Oriented Design and Discrete Event Simulation**. [S.l.]. 2012.

MACHUCA, J. P.; MILLER, M. E.; COLOMBI, J. M. **A Cognitive Task Analysis-based Evaluation of Remotely Piloted Aircraft Situation Awareness Transfer Mechanisms**. IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Aware and Decision Support. New Orleans, LA: [s.n.]. 2012.

MATTEI, A. et al. **IFA2S – In-Flight Awareness Augmentation Systems**. 12th International Conference on Information Technology - New Generations. Las Vegas: [s.n.]. 2015.

- MATTEI, A. L. et al. **UAV In-Flight Awareness: A Tool to Improve Safety**. 5TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS). Munich: [s.n.]. 2013.
- MATTEI, A. L. P. et al. **IFA2S - In-flight Awareness Augmentation Systems**. 12th International Conference on Information Technology - New Generations (ITNG). Las Vegas: IEEE. 2015. p. 95 - 100.
- MCAREE, O.; CHEN, W.-H. **Artificial situation awareness for autonomous terminal area operations of unmanned aerial systems**. AUVSI Unmanned Systems North America. [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1128-1142.
- MCAREE, O.; CHEN, W.-H. Artificial situation awareness for increased autonomy of unmanned aerial systems in the terminal area. **Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications**, p. 545-555, 2013.
- MCGEER, T. **Aerosonde hazard estimation**. [S.l.]. 1994.
- MCGEER, T.; NEWCOME, L.; VAGNERS, J. **Quantitative risk management as a regulatory approach to civil UAVs**. International Workshop on UAV Certification. [S.l.]: [s.n.]. 1999.
- MEJIAS, L. et al. Demonstration of closed-loop airborne sense-and-avoid using machine vision. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, 27(4), 2012. 4-7.
- MEKDECI, B. et al. **A taxonomy of perturbations: Determining the ways that systems lose value**. IEEE International Systems Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2012.
- MENDA, J. et al. Optical Brain Imaging to Enhance UAV Operator Training, Evaluation, and Interface Development. **Intell Robot Syst**, v. 61, p. 423–443, 2011.
- MURTHA, J. F. **Evidence Theory and Fault Tree Analysis to Cost-Effectively Improve Reliability in Small UAV Design**. Virginia Polytechnic Inst. & State University. [S.l.]. 2009.
- NADERPOUR, M.; LU, J.; KERRE, E. A Conceptual Model for Risk-Based Situation Awareness. In: ____ **Foundations of Intelligent Systems**. Berlin: Springer-Verlag, 2012. p. 297–306.
- NATO. **STANAG 4671**. [S.l.]. 2009.
- NEHME, C. E.; CUMMINGS, M. L.; CRANDALL, J. W. **A UAV Mission Hierarchy**. [S.l.]. 2006.
- NOMAMI, K. Prospect and Recent Research & Development for Civil Use Autonomous Unmanned Aircraft as UAV and MAV. **Journal of System Design and Dynamics**, v. 1, n. 2, 2007.
- NTSB, NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. Annual Aviation Statistics For 2012 Released. **NTSB Press Release**, 2013. Disponivel em: <<http://www.nts.gov/news/2013/130806b.html>>.

- NYQUIST, J. E. Unmanned aerial vehicles that even geoscience departments can afford. **Geotimes**, 42, 1997. 20-23.
- OBERKAMPF, W. et al. **Variability, uncertainty, and error in computational simulation**. Proceedings of the 7th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. [S.l.]: [s.n.]. 1998. p. 259-72.
- OBERKAMPF, W. et al. **A new methodology for the estimation of total uncertainty in computational simulation**. Non-Deterministic Approaches Forum, AIAA. [S.l.]: [s.n.]. 1999.
- OBERKAMPF, W.; HELTON, J.; SENTZ, K. **Mathematical representation of uncertainty**. Non-deterministic Approaches Forum, AIAA. [S.l.]: [s.n.]. 2001.
- OSBORNE, R. W. et al. **Design of an adaptive passive collision warning system for UAVs**. Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego, CA: Proceedings of the SPIE. 2009.
- OSBORNE, R. W. et al. Design of an adaptive passive collision warning system for UAVs. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 47, n. 3, 2011. 2169-2189.
- OZARTAN, M.; AKGUL, S.; AKCA, B. **A different view to future use of unmanned aerial vehicles**. International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2013. [S.l.]: [s.n.]. 2013. p. 167-172.
- OZARTAN, M.; AKGUL, S.; AKCA, B. **A Different View to Future Use of Unmanned Aerial Vehicles**. International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Atlanta, GA, USA: IEEE, Piscataway, NJ. 2013.
- PARASURAMAN, R.; COSENZO, K. A.; VISSER, E. D. Adaptive Automation for Human Supervision of Multiple Uninhabited Vehicles: Effects on Change Detection, Situation Awareness, and Mental Workload. **MILITARY PSYCHOLOGY**, v. 21, p. 270-297, 2009.
- PASTOR, E. et al. In-flight contingency management for unmanned aircraft systems. **Journal of Aerospace Information Systems**, v. 9, n. 4, p. 144-60, 2012.
- PATTERSON, T. et al. **Utilizing Geographic Information System Data for Unmanned Aerial Vehicle Position Estimation**. Canadian Conference on Computer and Robot Vision. [S.l.]: [s.n.]. 2011.
- PESTANA, M. E. **Flying unmanned aircraft: A pilot's perspective**. AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit. [S.l.]: [s.n.]. 2011.
- PLACKE, S.; THOMAS, J.; SUO, D. **Integration of Multiple Active Safety Systems using STPA**. [S.l.]: SAE 2015 World Congress & Exhibition. 2015.

- POJDA, J. et al. **Performance Analysis of Mesh Routing Protocols for UAV Swarming Applications**. 8th International Symposium on Wireless Communication Systems. Aachen: [s.n.]. 2011.
- PORCELLO, J. C. **Designing and Implementing OFDM Communications for Advanced Multifunction UAV Payloads using FPGAs**. IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: [s.n.]. 2012.
- PRIOR, S. D. et al. **Development of a novel platform for greater situational awareness in the urban military terrain**. 8th International Conference Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. [S.l.]: [s.n.]. 2009. p. 120-125.
- RAMACHANDRAN, U. et al. Large-Scale Situation Awareness With Camera Networks and Multimodal Sensing. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 4, p. 878-892, 2012.
- RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P. **Development of a complete UAV system using COTS equipment**. Aerospace conference, IEEE. Big Sky, MT: [s.n.]. 2009. p. 1 - 11.
- RATTADILOK, P.; PETROVSKI, A. **Inferential measurements for situation awareness**. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications. [S.l.]: [s.n.]. 2013. p. 93-98.
- REASON, J. The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. B, n. 327, p. 475-484, 1990.
- ROHDE, S.; PUTZKE, M.; WIETFELD, C. Ad hoc self-healing of OFDMA networks using UAV-based relays. **Ad Hoc Networks**, 11, n. 7, 2013. 1893-1906.
- ROYO, P. et al. **Service Abstraction Layer for UAV Flexible Application Development**. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV: AIAA. 2008.
- RTCA. **Guidance Material and Considerations for Unmanned Aircraft Systems**. [S.l.]. 2007.
- SAE AEROSPACE. **ARP4754-A Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems**. [S.l.]. 2010.
- SAE AEROSPACE. **SAE ARP 4761**. [S.l.]. 2015.
- SANYA, H. **FTA Based Runtime Evaluation of System Reliability for Autonomous Unmanned Vehicle**. Seventh International Conference on Computational Intelligence and Security. [S.l.]: [s.n.]. 2011.
- SCANLON, M. V.; LUDWIG, W. D. **Sensor and information fusion for improved hostile threat situational awareness**. Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and

Networking for Persistent ISR II. Orlando, USA: SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2011.

SCHOEMAKER, R.; SANDBRINK, R.; VAN VOORTHUIJSEN, G. **Intelligent route surveillance.** Unattended Ground, Sea, and Air Sensor Technologies and Applications XI. Orlando, USA: SPIE- The International Society for Optical Engineering. 2009.

SE, S. et al. **Automated UAV-based mapping for airborne reconnaissance and video exploitation.** Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications VI. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

SEPPÄNEN, H. et al. Developing shared situational awareness for emergency management. **Safety Science**, v. 55, p. 1-9, 2013.

SHAFFER, G. **A Mathematical Theory of Evidence.** [S.l.]: Princeton University Press, 1976.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution.** 2. ed. [S.l.]: ASQ Quality Press, 2003.

STARK, B.; STEVENSON, B.; CHEN, Y. **ADS-B for Small Unmanned Aerial Systems: Case Study and Regulatory Practices.** International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Atlanta, GA: IEEE. 2013. p. 152-9.

STARK, B.; STEVENSON, B.; CHEN, Y. **ADS-B for Small Unmanned Aerial Systems: Case Study and Regulatory Practices.** International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Atlanta, GA: IEEE. 2013. p. 152-9.

STARK, B.; STEVENSON, B.; CHEN, Y. **ADS-B for small Unmanned Aerial Systems: Case study and regulatory practices.** International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2013. [S.l.]: [s.n.]. 2013. p. 152-159.

SWARD, R. E.; COOPER, S. D.; SPARKMAN, C. H. **A Situational Awareness Tool For Unmanned Aerial Vehicles (UAVs).** United States Air Force Academy. Colorado. 2005.

THE BATTLEFIELD SITE. Hitler's Vengeance Weapons, 2013. Disponível em: <http://battlefield-site.co.uk/v_weapons.htm>. Acesso em: 29 nov. 2013.

THE GUARDIAN. UK Lost 450 UAS in Afghanistan and Iraq in 5 Years, 14 fev. 2013.

THE GUARDIAN. UK Lost 450 UAS in Afghanistan and Iraq in 5 Years, 14 fev. 2013.

THE MITCHELL INSTITUTE FOR AIRPOWER STUDIES. **Air Force UAVs The Secret History.** Arlington, VA. 2010.

- THEUNISSEN, E.; BOLDERHEIJ, F.; KOENERS, G. J. M. **Integration of Threat Information into the Route (Re-) Planning Task**. 24th Digital Avionics Systems Conference, DASC. [S.l.]: [s.n.]. 2005.
- TOZICKA, J.; ŠIŠLÁK, D.; PECHOUCEK, M. **Planning of diverse trajectories**. Proceedings of the 5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. [S.l.]: [s.n.]. 2013. p. 120-129.
- TULUM, K.; DURAK, U.; İDER, S. K. **Situation Aware UAV Mission Route Planning**. IEEE Aerospace conference. Big Sky, MT: [s.n.]. 2009.
- VELAGAPUDI, P. et al. **Environmental factors affecting situation awareness in unmanned aerial vehicles**. AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit. [S.l.]: [s.n.]. 2009.
- VELAGAPUDI, P. et al. **Environmental Factors Affecting Situation Awareness in Unmanned Aerial Vehicles**. AIAA Infotech@Aerospace. Seattle, Washington: AIAA. 2009.
- WANG, Z.; MARTEL, F.; SCHULTZ, R. **Reliability Assessment of Mid-Air Collision Avoidance System for Unmanned Aircraft Systems**. AIAA Infotech@Aerospace. Atlanta, Georgia: AIAA. 2010.
- WATTS, A. C.; AMBROSIA, V. G.; HINKLEY, E. A. **Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use**. Remote Sensing. [S.l.]: [s.n.]. 2012. p. 1671-1692.
- WEIBEL, R. E.; HANSMAN, J. **Safety Considerations for Operation of Different Classes of UAVs in the NAS**. AIAA's 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum. [S.l.]: [s.n.]. 2004.
- WEIBEL, R.; HANSMAN, J. **An Integrated Approach to Evaluating Risk Mitigation Measures for UAV Operational Concepts in the NAS**. Proceedings of the AIAA 4th Infotech Conference. Arlington, VA: [s.n.]. 2005.
- WEIBEL, R.; HANSMAN, J. **An Integrated Approach to Evaluating Risk Mitigation Measures for UAV Operational Concepts in the NAS**. Proceedings of the AIAA 4th Infotech Conference. Arlington, VA: [s.n.]. 2005.
- WILLIAMS, K. **A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications**. Oklahoma City, OK, USA. 2004.
- WILLIAMS, K. **A Summary of Unmanned Aircraft Accident/Incident Data: Human Factors Implications**. Oklahoma City, OK, USA. 2004.

YI, H. et al. **Experiment research on situation awareness of the operators for unmanned aerial vehicle**. IEEE International Conference on Computational Intelligence and Security. Guangzhou, China: [s.n.]. 2006.

YU, S. et al. **A Comparison of FMEA, AFMEA and FTA**. 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). Guiyang: IEEE. 2011. p. 954 - 960.

ZHANG, Y.; LUO, J.; HU, H. **Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards**. [S.l.]: Auerbach Publications, 2006.

Glossário

Acidente Aeronáutico. Toda ocorrência aeronáutica relacionada à operação de uma aeronave, no caso de uma aeronave tripulada, havida entre o momento em que uma pessoa nela embarca com a intenção de realizar um voo até o momento em que todas as pessoas tenham dela desembarcado ou, no caso de uma aeronave não tripulada, toda ocorrência havida entre o momento que a aeronave está pronta para se movimentar, com a intenção de voo, até a sua inércia total pelo término do voo, e seu sistema de propulsão tenha sido desligado e, durante os quais, pelo menos uma das situações abaixo ocorra:

- Uma pessoa sofra lesão grave ou venha a falecer;
- A aeronave sofra dano ou falha estrutural;
- A aeronave seja considerada desaparecida ou esteja em local inacessível.

Aeronave Pilotada Remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft, RPA*). Aeronave em que o piloto não está a bordo. É uma subcategoria de Veículos Aéreos Não Tripulados.

Aeronavegável significa que a aeronave está conforme com o seu projeto de tipo e está em uma condição de operação segura. 14CFR (FAA *Code of Federal Regulations*) §3.5.

Avaliação de risco. A avaliação de risco é um valor quantitativo atribuído a uma tarefa, ação ou evento na gestão da incerteza.

Consciência Situacional (CS). Percepção dos elementos no ambiente dentro de um volume de tempo e espaço, compreensão do seu significado e projeção de sua condição no futuro próximo.

Curso ou Proa. Direção do voo no plano horizontal medida em graus em relação ao norte magnético ou geográfico.

Elementos de risco. Existem quatro elementos fundamentais de risco na aviação: o piloto, o avião, o meio ambiente e as pressões externas que compõem uma situação específica.

Emergência. Condição urgente

Enxame de VANTs (*swarm*). Dois ou mais VANTs em voo coordenado.

Erro do piloto. Um acidente em que uma ação ou decisão tomada pelo piloto foi a causa ou um fator contribuinte que levou ao acidente.

Fatores humanos. Um campo multidisciplinar que engloba as ciências comportamentais, sociais, engenharia e fisiologia para estudo dos fatores que influenciam o desempenho humano na realização de atividades específicas.

Gestão de Atitude. A capacidade de reconhecer atitudes perigosas e a vontade de modificá-las.

In-Flight Awareness, IFA. Consciência situacional da aeronave no ambiente dentro de um volume de tempo e de espaço, a compreensão de seu significado e a projeção de seu status no futuro próximo.

In-Flight Awareness Augmentation System, IFA²S. Sistema embarcado voltado à melhoria da segurança de voo, derivado do modelo de referência IFA e desenvolvido para uma aeronave e ambiente operacional específicos.

Julgamento. O processo de reconhecer e analisar toda a informação pertinente em uma determinada situação, uma avaliação das ações alternativas e uma decisão sobre a ação oportuna.

Orientação. Consciência da posição da aeronave em relação a um ponto de referência específico.

Perigo. Condição atual, evento, objeto ou circunstância pode causar ou contribuir para um evento não planejado ou indesejado, como um acidente.

Piloto automático. Um sistema de controle de voo automático que mantém uma aeronave em atitude e curso adequados para o que foi definido para a missão ou momento.

Piloto em Comando. Membro da tripulação habilitado sem restrições para a aeronave e a operação a ser conduzida, sendo responsável pela segurança da operação, da aeronave e das pessoas a bordo.

Risco aceitável. Risco identificado em que é permitido a prosseguir sem novas medidas de engenharia ou de gestão.

Risco identificado. Risco que foi determinado por meio de técnicas de análise. A primeira tarefa de segurança do sistema é identificar, dentro das limitações de ordem prática, todos os riscos possíveis.

Risco inaceitável. Risco que não pode ser tolerado. É um subconjunto dos riscos identificados que deve ser eliminado ou mitigado.

Risco não identificado. Risco ainda não identificado. Alguns riscos não identificados são eventualmente identificados a posteriori quando ocorre um acidente.

Risco Total. A soma dos riscos identificados e não identificados.

Rota. A linha ou faixa ao longo do qual a aeronave está voando ou voará.

Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (*Remotely-Piloted Aircraft System*, RPAS). Conjunto de elementos abrangendo uma aeronave pilotada remotamente, a estação de pilotagem remota correspondente, os enlaces de comando e controle requeridos e quaisquer outros elementos que podem ser necessários a qualquer momento durante a operação.

Sistema de Posicionamento Global (GPS). Sistema particular de GNSS.

Sistema de Veículo Aéreo Não Tripulado (SISVANT). Aeronave e componentes associados destinados à operação sem piloto a bordo.

Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). Sistema de navegação por satélite que fornece o posicionamento geoespacial com cobertura global.

Tomada de decisão. Uma abordagem sistemática para o processo utilizado de forma consistente para determinar o melhor curso de ação em resposta a um determinado conjunto de circunstâncias.

Ultra-High Frequency (UHF). Frequências de rádio na faixa entre 300 MHz e 3 GHz

Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Aeronave projetada para operar sem piloto a bordo e que não seja utilizada para fins meramente recreativos.

Very-High Frequency (VHF). Frequências de rádio na faixa entre 30 e 300 MHz.

Voo controlado contra o terreno. Um acidente em que uma aeronave em perfeito estado de aeronavegabilidade atinge o terreno, obstáculo ou água.